

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

EXPERTNÍ SYSTÉM PRO VOLBU VHODNÉ METODY VYUŽITÍ ODPADŮ

EXPERT SYSTEM FOR CHOICE OF PROPER METHOD FOR WASTE UTILIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. JOSEF FIKAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDR. JIŘÍ DVOŘÁK, CSC.

BRNO 2011

ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

(na místo tohoto listu vložte originál a nebo kopii zadání Vaší práce)

LICENČNÍ SMLOUVA

(na místo tohoto listu vložte vyplněný a podepsaný list formuláře licenčního ujednání)

ABSTRAKT

Práce spočívá ve vývoji expertního systému pro účely volby vhodné metody zpracování odpadů. Výsledný expertní systém je vytvořen v softwaru VisiRule, který je s postaven na jazyce Prolog a je součástí vývojového prostředí WinProlog 4.900. Dále se zabývá problematikou tvorby znalostní báze pro aplikace takového typu a posouzením vhodnosti možných přístupů k tvorbě expertního systému pro daný účel.

ABSTRACT

This work consists in development of expert system intended for choosing appropriate method of waste processing. The software is created in VisiRule software which is built on Prolog language and is part of WinProlog 4.900 development tool. It also deals with problematics of creating of knowledge base for applications of this type and judging of suitability of possible approaches to creating an expert system for given purpose.

KLÍČOVÁ SLOVA

Expertní systém, zpracování odpadů, Prolog, VisiRule, znalostní báze.

KEYWORDS

Expert system, waste processing, Prolog, VisiRule, knowledge base.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího diplomové práce.

V Brně, 27. května 2011

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FIKAR, J. Expertní systém pro volbu vhodné metody využití odpadů. Brno, 2011. 87 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na Ústavu automatizace a informatiky. Vedoucí diplomové práce RNDr. Jiří Dvořák CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce RNDr. Jiřímu Dvořákovi CSc. za podnětné rady a náměty k tvorbě této práce.

Velký dík patří také RNDr. Jaroslavu Jíchovi CSc. z Ústavu procesního a ekologického inženýrství, a Ing. Radku Veselému za to, že se se mnou obětavě podělili o jejich znalosti a zkušenosti z oboru odpadního hospodářství.

Obsah:

1	Úvod.....	17
2	Problematika zpracování odpadů.....	19
2.1	Druhy odpadu.....	19
2.1.1	Komunální odpad.....	19
2.1.2	Průmyslový odpad.....	21
2.2	Metody zpracování.....	22
2.2.1	Spalování	23
2.2.2	Skládkování	24
2.2.3	Druhotné zpracování -recyklace, energetické využití.....	28
3	Expertní systémy.....	31
3.1	Historie expertních systémů.....	31
3.2	Princip činnosti expertních systémů.....	31
3.2.1	Architektura znalostních systémů	34
3.2.2	Dopředné řetězení.....	35
3.2.3	Zpětné řetězení	37
3.3	Prostředky pro tvorbu ES	38
3.3.1	Lisp.....	38
3.3.2	Prolog.....	42
4	Expertní systémy použité v oblasti zpracování odpadů.....	49
4.1	Expertní systém pro odpadové hospodářství.....	50
4.1.1	Přístup dle Wai & Weber [5].....	50
4.1.2	Vývoj báze technických znalostí.....	51
4.1.3	Vývoj báze politicko-sociálních znalostí.....	51
4.1.4	Vývoj samotného expertního systému.....	52
4.2	Výběr lokality pro skládku [7].....	53
4.3	Výběr metod pro zpracování a recyklaci [4].....	53
4.4	Výběr sběrných metod a systému transportu [4].....	54
5	Prostředky použité k řešení problému.....	55
5.1	WinProlog 4.900.....	55
5.2	Komponenty WP 4.900.....	55
5.2.1	Flex.....	55
5.2.2	VisiRule	56
5.2.3	Zpracování neurčitosti [27].....	60
6	Popis systému	63
6.1	Sběr dat.....	64
6.2	Komunikace s uživatelem.....	64
6.3	Struktura používaných dat	66
6.4	Moduly systému.....	67
6.4.1	Modul komunálních odpadů.....	68
6.4.2	Modul odpadů z firem	70
6.4.3	Jiný přístup.....	74
6.4.4	Modul konečných vyhodnocení.....	76
7	Závěr.....	81
8	Seznam použité literatury.....	83

1 ÚVOD

Existuje mnoho aspektů života v lidské společnosti, které jsou společnými jmenovateli prakticky všech lidmi osídlených oblastí na celém světě, ať už se jedná o malou vsí v jižních Čechách, nebo o mohutné velkoměsto ve východní Asii. Jedním z těchto společných rysů je fakt, že všechna tato uskupení produkují nejrůznější druhy odpadních materiálů a musí následně řešit otázku jejich správného nakládání a zpracování. Látek, produkovaných při výrobě, zpracování, transportu, balení, ba i při prostém používání výrobků je celá řada od relativně neškodných, jako papír a sklo, přes škodlivé, jako například těžké kovy, až po velice toxické, jako odpady z nejrůznějších chemických procesů či v extrémním případě odpady z jaderných elektráren. Od snadno a výhodně recyklovatelných (oceli) až po zcela nevyužitelné látky, které krom toho, že nemají další využití, ještě navíc kontaminují své okolí a je velice obtížné je skladovat i transportovat (jaderný odpad). Všechny tyto látky musí být nakonec nějakým způsobem zpracovány, ať už v ideálním případě jejich využitím pro další produkci - renovací či recyklací, nebo způsobem jež má za následek odstranění odpadních látek z oběhu - spalování, skládkování a pod. Především ve velkých městech je objem odpadu v poměru na jednoho obyvatele enormně velký a náklady na jeho zpracování tvoří nezanedbatelnou položku městského (státního/firemního) rozpočtu. Vedle ekonomické stránky problému je třeba zohlednit také ekologické dopady využití odpadních látek. Spalovny jsou schopny zredukovat odpad na pouhý zlomek jeho původního objemu, a navíc je možno s nimi produkovat jisté množství energie. Na druhou stranu však chrlí do ovzduší mnohdy nebezpečné částičky popela, který je potřeba filtrovat. Skládky naopak nechávají odpad rozložit pomalejší, přirozenější cestou, ovšem hrozí riziko znečištění podzemních vod a kontaminace půdy, v případě, že jedovaté látky prosáknou mimo oblast vymezenou pro skládku. Aby bylo možné se odpadu zbavovat efektivně, je třeba vzít v úvahu celou řadu faktorů jež rozhodují o vhodnosti použití konkrétních metod na konkrétní typ zpracovávaných látek. Mezi tyto faktory patří mimo jiné míra recyklovatelnosti, energetická návratnost spalování, riziko uvolňování toxických látek, míra škodlivosti a ekologické zátěže a mnoho dalších. Nesprávné rozhodnutí ohledně způsobu zpracování odpadu může být nejen neekonomické a způsobit tak finanční ztrátu, ale především může způsobit značnou škodu na ekosystému.

Je tedy zřejmé, že rozhodování o způsobu využití odpadních látek vyžaduje kvalifikovaného odborníka s mnoha znalostmi a zkušenostmi získanými nejlépe letitou praxí. Takovýchto odborníků ovšem není neomezeně a vzhledem k tomu, že volba metody zpracování odpadních látek je zpravidla prováděna na regionální úrovni, nelze se divit, že kvalifikovaný názor mnohdy chybí.

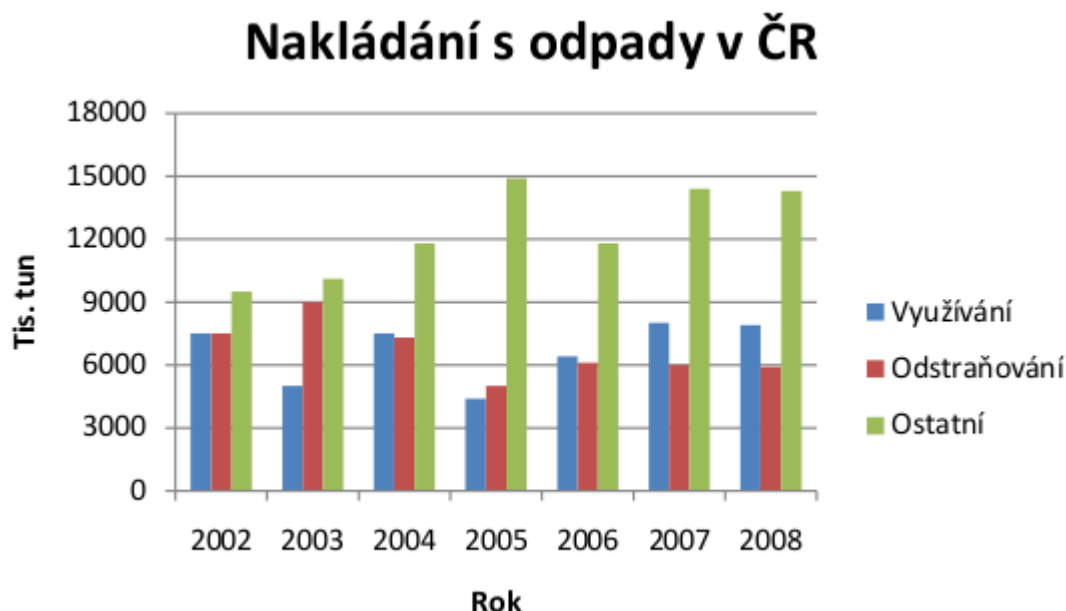
S rozvojem informačních technologií a především pak algoritmů umělé inteligence, dostává člověk do rukou stále nové a propracovanější nástroje pro řešení problémů tam, kde lidské schopnosti přestávají stačit v rychlosti a objemu zpracovávaných informací, či prostě tam, kde člověk s požadovanými znalostmi zkrátka není k dispozici. Jedním z takovýchto nástrojů jsou tak zvané expertní systémy, které mají z úkol nahradit lidského odborníka v jisté oblasti - experta a převzít za něj úlohu v rozhodování.

2 PROBLEMATIKA ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

Otázka vhodného zpracování odpadů je ožehavá ekologická, politická a ekonomická problematika ve městech a obcích na celém světě. A netýká se zdaleka pouze odpadů evidentně škodlivých jakými jsou toxické látky a chemikálie. I mnoho předmětů z běžné domácí potřeby jako starý televizor, lednička, ba i obyčejná PET lahev, se při nevhodném uskladnění mohou proměnit v závažná rizika pro lokální ekosystém. Je tedy zapotřebí pečlivě zvážit způsob, kterým bude naloženo s nadále již nepotřebnými předměty a látkami tak, aby měl pokud možno minimální ekologické dopady. Takové rozhodnutí se však neobejde také bez zvážení ekonomických aspektů věci, které mohou být (nikoliv nezbytně) v přímém rozporu s těmi ekologickými. V následující kapitole, která vychází převážně z diplomové práce J. Šoupala z r. 2006 [14] jsou stručně popsány nejpoužívanější metody zpracování odpadů komunálních, i průmyslových.

2.1 Druhy odpadu

Stejně jako metody zpracování, způsoby využití a vlastní produkce odpadů, i samotné druhy odpadů jsou definovány v rámci platné legislativy. V současné době platí v České republice zákon č. 185/2001 [15]. Každému druhu odpadu je přiděleno tzv. katalogové číslo, ve kterém se ukrývají základní údaje o původu odpadu, složení, obsažených látkách a nebezpečnosti. Skupiny odpadů jsou tříděny do podskupin a tento systém navazuje na systém tříd odpadů platný v rámci EU [14]. Pro větší názornost je níže uveden neoficiální způsob dělení odpadů, který nemusí přesně kopírovat způsob uvedený v zákoně 185/2001.



Obr. 1 Nakládání z odpady v ČR v letech 2002 až 2008 [19]

Dělení odpadů podle jejich původu:

2.1.1 Komunální odpad

Toto jsou odpady produkované převážně domácnostmi, ale také směsný odpad, který produkují obchody, úřady, vládní instituce a další, zpravidla neprůmyslové podniky.

Charakteristickým rysem komunálního odpadu je jeho různorodé složení, obsahující širokou paletu látek od organických kuchyňských zbytků až po látky typu sutiny, popel apod. Tato vlastnost činí komunální odpad obzvláště obtížným ke zpracování. Naproti tomu však komunální odpady zpravidla obsahují pouze minimum škodlivých látek. Do složení komunálního odpadu patří například také [14]:

- Odpadky (drobný komunální odpad vznikající převážně v oblasti občanské vybavenosti, služeb a odpad z domácností).
- Tuhý domovní odpad (tuhý domovní odpad vznikající v oblasti bydlení tj. v obytných domech. Příkladem mohou být zbytky potravin, použité obaly, popel topenišť a domovních kotlen apod.).
- Kuchyňský odpad (zbytky potravin).
- Odpad ze (sídelní) zeleně (odpad, který vzniká při údržbě zahrad, sadů, parků, hřbitovů, hřišť, doprovodné zeleně komunikací apod.).
- Objemný komunální odpad (odpad větších rozměrů, který nelze shromažďovat v normalizačních nádobách o objemu 1100 litrů a menších).
- Sběrový odpad (sběrová surovina – oddělená složka odpadu získávaná odděleným sběrem).

Složení tuhých komunálních odpadů pro město Brno dle odboru životního prostředí ukazuje tab.1

Druh složek	% obsah
kuchyňský odpad	39,4
papír	21,2
sklo	10,7
plasty	9,3
železo	6,0
textil	3,9
minerální odpad	4,2
hliník	2,1
dřevo	1,6
ostatní	1,6
Celkem %	100,0

Obr. 2 Tab. 1 Složení komunálních odpadů pro město Brno

Plán odpadového hospodářství odboru životního prostředí magistrátu města Brna z roku 2006 uvádí pro léta 2003 a 2004 následující údaje o zastoupení nebezpečných látek v komunálním odpadu:

Produkce odpadů statutární město Brno		2003		2004		Změna produkce 2004/2003	Měrná produkce 2004
		t	%	t	%	%	kg/obyvatele
Celkem odpadů		96 610	100	97 838	100	101	264
v tom:	Ostatní	95 872	99,2	97 046	99,2	101	262
	Nebezpečné	738	0,8	793	0,8	107	2

Obr. 3 POH Brno [20], hlášení o produkci a nakládání s odpady.

Komunální odpad produkovaný jednotlivci a domácnostmi však může být také tříděn pro vyselektování recyklovatelných materiálů na papír, sklo a plasty, kovy atd, a to prostřednictvím kontejnerů umístěných volně na sběrných místech a ve sběrných střediscích odpadů. Jednotlivá sběrná stanoviště jsou buď pouze pro jeden druh odpadu, případně jsou na nich umístěny nádoby na více druhů odpadů v závislosti na možnostech místa. Vzhledem k výhodám třídění odpadů je přirozenou snahou každé obce motivovat své občany ke svědomitému nakládání s vlastními odpady. Dle plánu odpadového hospodářství města Brna z roku 2006 byla produkce tříděných odpadů následující:

Název odpadu	Katalogové číslo odpadu	Kategorie odpadu	Produkce 2003	Produkce 2004
			t	t
Sklo	200102	O	1267	1305
Papír a lepenka	200101	O	1036	1110
Plasty	200139	O	308	311

Obr. 4 POH Brno [20], Produkce tříděných odpadů města Brna.

2.1.2 Průmyslový odpad

Do skupiny průmyslového odpadu lze zahrnout odpady produkované nejen strojírenskými výrobními podniky, ale také odpad z chemických, potravinářských i zemědělských odvětví průmyslu. Odpad produkovaný těmito procesy bývá mnohem častěji nebezpečného rázu než komunální odpad [21].

- Mezi nejčastější zástupce průmyslových odpadů patří nejrůznější organické a anorganické chemikálie vzniklé jako vedlejší produkty z chemických výrob a jako polotovary a meziprodukty – chlor, amoniak, hydroxid sodný, kyselina fosforečná.
- Dále různé druhy polymerů a změkčovadel, které obzvláště odolávají chemickým a biologickým procesům odbourávání. U některých polymerů může trvat i mnoho stovek let než se přirozenou cestou rozloží. - formaldehyd, vinylchlorid, propylen, atd.
- Kovové odpady – kromě řady druhů ocelí, které se hodí na recyklaci a znovu využití v hutích a ocelárnách, případně některých barevných (měď) a vzácných

- (stříbro) kovů vhodných pro druhotné zpracování, vznikají také opady složené z těžkých kovů, které jsou toxické a velice nebezpečné – zejména rtuť či olovo.
- Odpady vzniklé strojírenskou výrobou – zejména látky určené pro povrchovou úpravu výrobků jako barvy, laky, chlorované uhlovodíky. Dále pak chemikálie používané při kovoobrábění jako chladicí emulze, řezné oleje a jimi znečištěné třísky. Mazací prostředky – minerální oleje, vazeliny, tuky, ale také odmašťovací přípravky a organická rozpouštědla.
 - Hutní průmysl produkuje velké množství popelu a strusky.
 - Škvára a sutina ze stavebnictví, demoliční materiály, odpady ze stavby pozemních komunikací.
 - Energetický průmysl je velkým producentem tuhého odpadu, tvořícího převážně popel, popílek a jiné vyhořelé látky.
 - Dále bychom mohli zahrnout odpady z petrochemického průmyslu – vniklé ať ji při získávání, dopravě, či zpracování ropy.
 - Radioaktivní odpady z jaderných elektráren jsou jedny z vůbec nejnebezpečnějších.
 - Zemědělský a lesnický odpad – krom rostlinných zbytků, osiv a zvířecí mrvy také prostředky pro ošetřování plodin – pesticidy, herbicidy a další agrochemikálie.

Odpad produkovaný průmyslovou činností tvoří velkou část celkového objemu odpadů regionu. Mezi největší producenty odpadních látek patří průmysl energetický, stavební a strojírenský.

2.2 Metody zpracování

V dnešních dnech máme k dispozici celou řadu způsobů, jak se zbavit nechtěných odpadů, každý s vlastními výhodami a nevýhodami. Obecně se dá říci, že trendem posledních let je snaha o využívání termických procesů ve spalovnách. V minulosti byl tento způsob zpracování odpadů opomíjen především kvůli velkému množství škodlivého popela, který byl vypouštěn do ovzduší. Díky moderním filtračním metodám a přísné legislativě byl však tento problém do značné míry zredukován, což učinilo ze spaloven jednu z nejvýhodnějších metod odstraňování odpadu. Přesto i spalovny mají svá omezení ať již technická či ekonomická a tak mají ostatní způsoby zpracování odpadů stále své místo v procesu rozhodování o tom, jak s odpady naložit.[1]



Obr. 5 Způsoby nakládání s odpady v ČR. [1]

2.2.1 Spalování

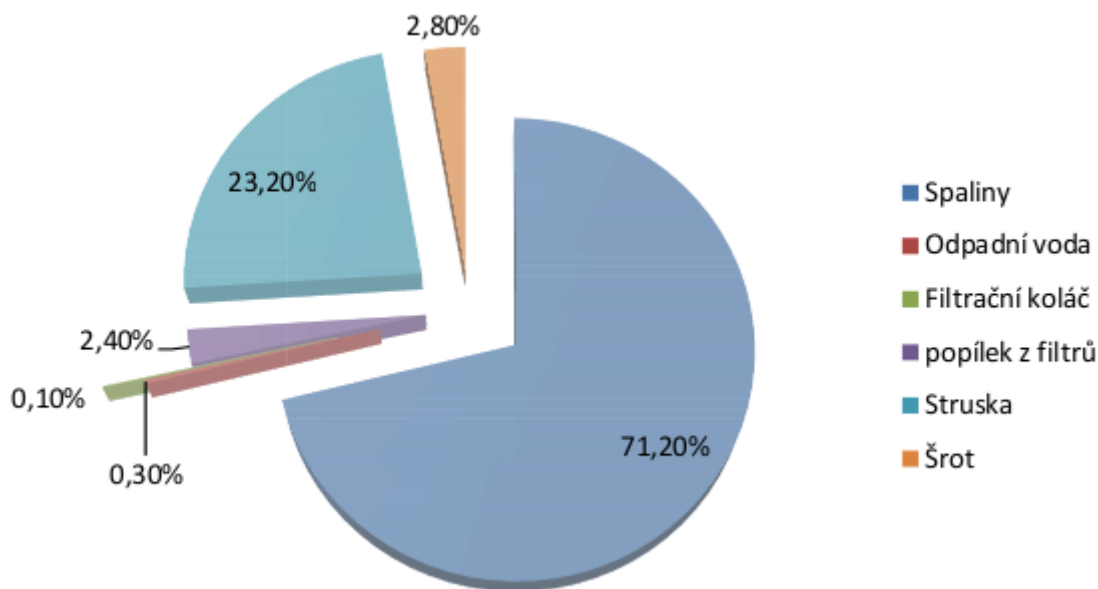
Pod pojmem spalování odpadů, nebo obecněji řečeno termické zpracování, se skrývá takový způsob odstraňování odpadních látek, který pomocí vysokých teplot a následně inicializované oxidace redukuje množství odpadu na zlomek jeho původního objemu. Vzhledem k tomu, že odpady tvoří zpravidla vysoce heterogenní směs tvořená velkým obsahem organických látek, minerálů a vody, je nezdůvodnitelně zapotřebí přivádět dodatečné látky – palivo pro podporu hoření. Ne všechny látky takovou podporu vyžadují, neboť jejich výhřevnost dosahuje dostatečné hodnoty, aby byla při dosažení jisté teploty (za přívodu kyslíku) nastartována termická řetězová reakce a tedy došlo k samo spalování [19].

Dobře hořlavé odpady s dostatečnou výhřevností nejen že po zažehnutí nevyžadují další přívod paliva, ale především mohou posloužit samy jako palivo pro výrobu energie. Proto je výhodné odpad před jeho spálením nejdříve roztřídit a podrobit analýze výhřevnosti a energetické návratnosti [19].

Do obecně pojatého termínu termické zpracování lze zařadit několik technologií postavených na základě oxidace za vysokých teplot [19].

- Spalování směsného komunálního odpadu: zpracování neupraveného odpadu pocházejícího z domácností a městského odpadu. Je zde možno spalovat také živnostenský a průmyslový odpad, který není klasifikován jako nebezpečný. Z důvodů výše uvedených je dnes v drtivé většině spaloven odpad tříděn a klasifikován dle vhodnosti daného odpadu ke spálení a na základě těchto kritérií zpracován.
- Pyrolýza je de facto další fází v procesu termického zpracování. Organické látky jsou rozkládány za teplot v rozmezí 250 – 750 °C a to bez přístupu vzduchu. Pyrolýzu může následovat proces
- Zplyňování, při kterém jsou organické látky za vysokých teplot (až 1600 °C) převáděny do plynné fáze. Při tomto procesu reagují uhlíkaté zbytky v odpadu s vodní parou a CO₂.

Spalování má tu výhodu, že s jeho pomocí lze likvidovat i některé nebezpečné látky. Mnoho z nich ovšem vyžaduje speciální postupy při spalování, zejména pak využití velmi vysokých teplot. Čím vyšší teplota, tím je větší účinnost zneškodnění nebezpečných látek. Pro zajištění bezpečné likvidace drtivé většiny spalitelných nebezpečných látek by bylo zapotřebí dosáhnout teplot kolem 2200 °C. Takové spalovny k dispozici jsou, nicméně kvůli technologickým nárokům na taková zařízení je jejich vybudování velice ekonomicky náročné a tedy jejich omezený počet – a tím pádem i kapacita – vede někdy k nutnosti zlikvidovat odpad jiným způsobem.



Obr. 6 Produkty spalování. [19]

2.2.2 Skládkování

Skládkování je u nás v dnešní době stále nejčastějším způsobem odstraňování odpadů, a to především komunálních. V rámci evropské unie převládá trend o jednoznačné omezení využívání skládkování jako metody nakládání z odpady a to v rámci snahy o omezení vzniku odpadu, intenzivnějšího využívání recyklace a efektivnějších metod druhotného využití

odpadových látek (například pro výrobu energie) [16].

Skládky je zapotřebí technicky zajistit, aby nedocházelo k úniku skladovaných látek do okolí. K tomu dochází mimo jiné kvůli tzv. průsakové vodě. Vzhledem k tomu, že většina skládek je vystavena působení deště, dochází ke kontaminaci přijímané vlhkosti. Aby se zabránilo průsaku takto znečištěné vody do okolí, je zapotřebí skládku nejprve zajistit systémem zachytávání a odvádění průsakové vody.

Dalším nezanedbatelným aspektem skládek je skládkový plyn. To je v podstatě bioplyn vznikající na skládkách rozkladem biologicky rozložitelných látek. Tento plyn vzniká v celém tělese skládky a nerovnoměrně se šíří napříč vrstvami, přičemž může způsobovat změny tvaru a konzistence skládky. Skládkový plyn dnes již bývá ve většině případů jímán a dále využíván.

Nevýhody skládkování [16]:

- Skládkování je ekologicky problematické jednak tím, že hrozí riziko kontaminace půdy a podzemních vod v případě, že dojde k průsaku škodlivých látek uložených na skládce v důsledku nesprávného technického zajištění skládky a jejího okolí.
- Velké množství látek, uskladňovaných na skládkách by mohlo být ještě využito, ať již materiálově pomocí recyklačních metod nebo k výrobě energie (bioplyn z biologicky rozložitelných odpadů). Množství uložených látek se tak stává potenciálně cennou surovinou, se kterou se skládkováním plýtvá.
- Skládkování je dlouhodobý proces. Obecně se počítá životnost skládek na desítky let, přičemž i po jejím uzavření o ni musí být dalších 30 let pečováno a monitorováno. Některým odpadům ovšem trvá mnohem déle (i stovky let) než se rozloží.
- Skládky mají nepříznivý vliv na své okolí, a to nejen estetický, ale v případě že vznikající skládkový plyn není řádně jímán a zpracováván, může docházet k úniku škodlivých látek do ovzduší
- V důsledku předchozího bodu také bývá v okolí skládek značný zápach.



Obr. 7 Skládka odpadů.

Ukládání odpadů na skládky, jejich monitorování stejně jako samotné technické zajištění skládek z pohledu údržby i výstavby reguluje platná legislativa. Hlavními požadavky na

řízenou skládku jsou [16]:

- Dokonalý těsnicí systém, či jiné bariéry, které oddělují skládku od okolního prostředí.
- Drenážní systém a zařízení na zneškodňování odvedených škodlivin.
- Zařízení na jímání skládkového plynu, pokud tento vzniká.
- Zařízení na příjem, hutnění a ošetření odpadu.
- Monitorovací systém úniku průsakové vody a migrace plynu.

Krom výše zmíněného musí být odpady na řízené skládce pravidelně zhutňovány a zaváženy dostatečně silnou vrstvou vhodné zeminy. V neposlední řadě je nutno okolí skládky po jejím uzavření řádným způsobem zrekultivovat.

Druhy skládek

Dle způsobu konstrukce můžeme skládky dělit na [16]:

- Podúrovňové, kde převážná část jejich objemu je pod úrovní okolní krajiny.
- Nadúrovňové, které jsou stavěny jako kopce (haldy, hromady).
- Kombinované, které mají část objem pod zemí a část nad zemí.

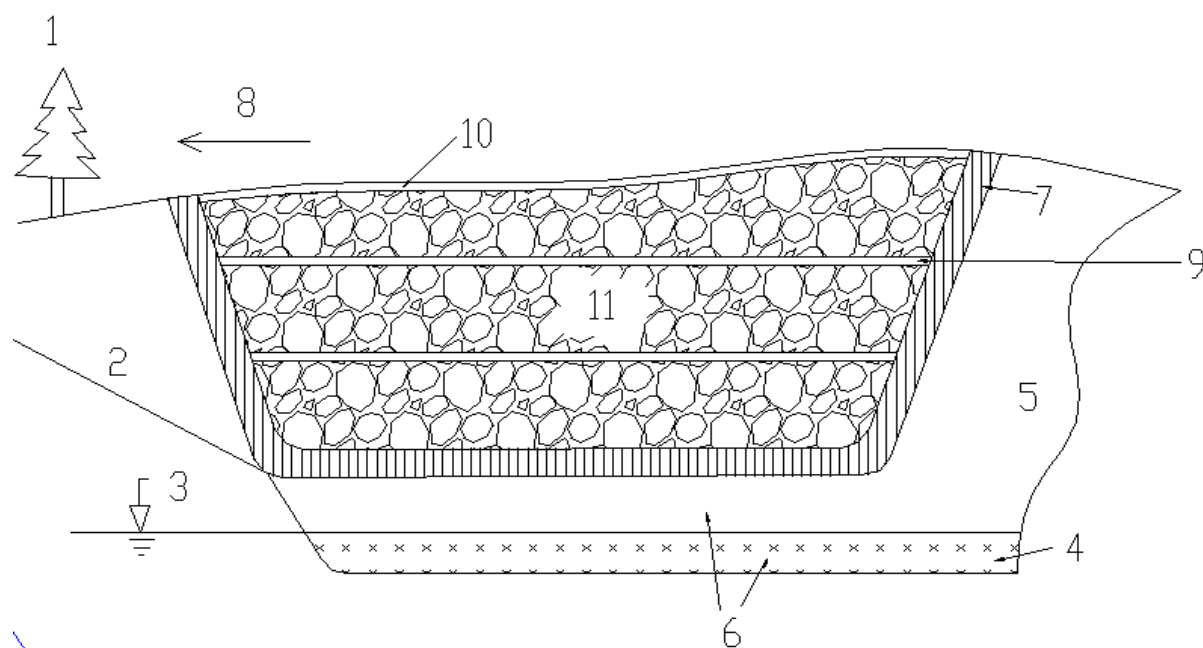
Jiný způsob dělení skládek lze definovat na základě zabezpečení, jež ukládá vyhláška č. 294/2005:

- Skupina S-IO - inertní odpad, tedy látky typu zemina, kamení, suť, popel a podobně. Takovéto materiály jsou zpravidla těžko rozpustné, chemicky neaktivní, biologicky se nerozkládají a proto ani nevzniká odpadní plyn a není zapotřebí stavět podkladové těsnění ani systém odvádění průsakové vody.
- Skupina S-OO - ostatní odpad, tedy veškerý odpad komunální i průmyslový s výjimkou látek nebezpečných.
- Skupina S-NO – nebezpečný odpad (chemikálie).

Skládka	Okres	Hypotetická / max. povolená kapacita skládky (tisíce m ³)	Odhad dosud využitá kapacity (tisíce m ³)	Uloženo v roce 2006 (t)	Maximální předpokládaný provoz
Skládka Růžov	CB	1 700/500	60	> 30 000	1998–2066
Skládka odpadů Lověšice	CK	1 500/500	330	15 000	1993–2030
Řízená skládka odpadů Želeč	TA	1 200/250	170	42 000	1996–2009
Středisko likvidace odpadů – Fedrpuš	JH	730/375	280	25 000	1996–2025
Skládka odpadů města Písek Smrkovice – Vydľaby	PI	1 000/720	500	25 000	1993–2016
Řízená skládka odpadů Vodňany	ST	465/350	295	28 000	1994–2018
Skládka odpadů – Borek	JH	430/430	200	16 500	1995–2026
Skládka SKO – Libínské Sedlo	PR	236/105	150	10 500	1994–2020
Řízená skládka TKO Český Krumlov	CK	195/140	130	6 500	1996–2008/2013
Skládka TKO Munice	CB	125/95	33	3 000	1993

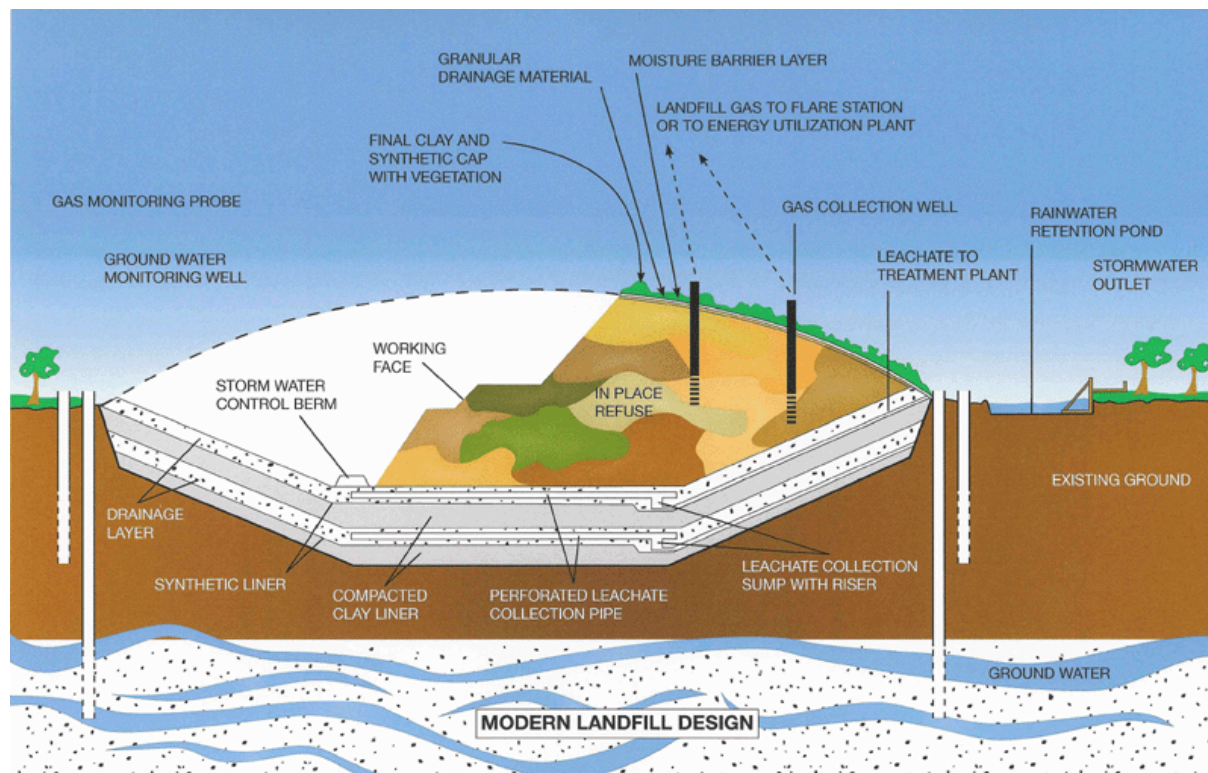
Obr. 8 Srovnání látek ostatních odpadů v Jihočeském kraji dle celkové předpokládané kapacity. [17]

Existují samozřejmě i odpady, které legálně skládkovat vůbec nelze. Takovými jsou například látky vysoce hořlavé, výbušné, infekční.



Obr. 9 Podúrovňová skládka. [16]

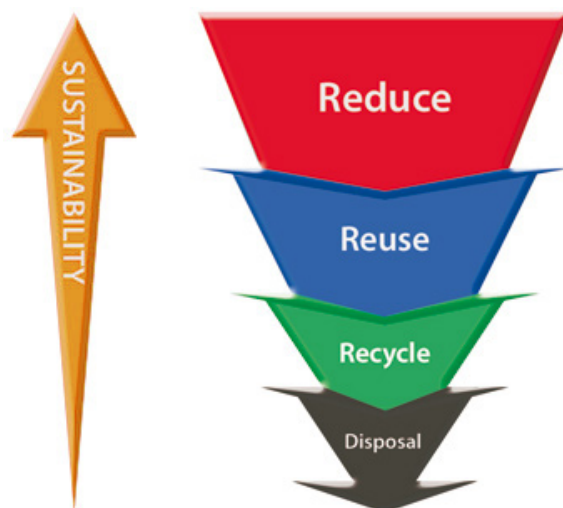
- 1 – větrolam, 2 – příjezdová rampa, 3 – hladina podzemní vody, 4 – demoliční materiál,
 5 – výkopová zemina, 6 – neškodné anorganické látky, 7 – stavební konstrukce,
 8 – spád, 9 – mezivrstva, 10 – ozeleněná krycí vrstva, 11 – vrstva odpadu, max. 1,8 m



Obr. 10 Moderní design kombinované skládky. [22]

2.2.3 Druhotné zpracování -recyklace, energetické využití.

V posledních desetiletích se stále více dostává do popředí otázka využívání a omezování vzniku odpadů na úkor jejich zneškodňování. V dřívějších dobách lidé veškerý odpad jednoduše likvidovali a nezamýšleli se nad myšlenkou, že by se daly odpadní látky dále využít. V dnešní době, kdy ekologické aspekty hrají významnou roli nejen v oblasti nakládání s odpady, ale i ve všech ostatních odvětvích lidské činnosti, není možné otázku recyklace zanedbat. Ochrana životního prostředí se stala nedílnou součástí v rozhodovacích procesech a spolu s nároky na čistší a ekologicky šetrnější technologie rostou také energetické nároky obcí a podniků. Nezanedbatelnou roli hraje také dostupnost surovin a přírodních zdrojů pro výrobu materiálů. Důsledkem všech výše zmíněných důvodů je skutečnost, že recyklace, či využívání odpadů obecně, patří na přední příčky v hierarchii rozhodování o tom, jak s nimi naložit. Pochopitelně, první místo patří snaze o omezování samotného vzniku odpadů, neboť prakticky žádná technologie nemůže zajistit využití použitých materiálů na sto procent. Důležitou roli recyklace potvrzuje fakt, že prakticky všechny obce v ČR (a nejen zde) disponují nějakým druhem recyklačního systému – tříděním odpadů, sběrnými dvory, recyklačními centry atd.



Obr. 11 Priority způsobů nakládání s odpady. [24]

Pojem recyklace jako takový znamená alternativní využití materiálů místo jejich zneškodnění. Místo jejich uložení na skládku či spálení se použijí k výrobě jiných materiálů a následně výrobků. Pomocí recyklace je možno výrazně snížit objem odpadu, který by se musel likvidovat a zároveň ušetřit suroviny a energii pro výrobu zboží, které lze vyrobit z již použitých materiálů. Zdaleka ne všechny materiály lze recyklovat, ale mezi klasické zástupce dobře recyklovatelných látek patří

- Kovy -především železo, měď, hliník.
- Plasty – především PET lahve kvůli jejich obrovskému množství, ale nejen ty.
- Sklo – zpravidla je třeba ještě vytrdit na sklo bílé a barevné.
- Papír – prakticky veškeré druhy papíru, kromě těch, které jsou smíchány s velkým množstvím jiných látek.
- Bio odpad – i mnoho organických zbytků, např. z kuchyní – různé slupky, odřezky, zbytky, vyhozené kazící se potraviny mohou být použity jako hnojivo či využity ke kompostování.

Z pochopitelných důvodů, většinou není možno dosáhnout stejně kvalitního recyklovaného materiálu jako toho, který vznikl prvotní výrobou. Ostatně ani výrobky z takových materiálů neslouží stejnému účelu jako ty, z nichž byly zrecyklovány (např. z plastu získaného z PET lahví se vyrobí dětská hračka).

Mezi hlavními výhodami recyklování patří, že:

- vede k lepšímu využití dostupných zdrojů
- snižuje ekologické dopady na životní prostředí
- šetří místo na skládkách a ve spalovnách
- snižuje množství odpadu k likvidaci
- šetří suroviny, energii a peníze

3 EXPERTNÍ SYSTÉMY

Expertní systém je jednou z nejvíce rozšířených aplikací umělé inteligence. Jeho účelem je pomoci při rozhodování, navrhování, diagnóze a analýze nejrůznějších problémů vyžadujících rozsáhlé znalosti mnohdy z několika různých oborů. S úspěchem se využívá tam, kde je zapotřebí využívat znalosti expertů z více oborů, jejichž vzájemná komunikace by mohla být komplikovaná. Expertní systém má za úkol nahradit jednoho, ale i celou skupinu lidských expertů všude tam, kde je kvalifikovaných pracovníků nedostatek, či kde zapotřebí zpřístupnit využití rozsáhlých znalostí širšímu okruhu uživatelů.

K těmto účelům využívají expertní systémy rozsáhlou bázi znalostí, která je za pomoci lidských expertů sestavena při tvorbě systému a kterou mohou zpravidla také rozšiřovat pomocí nástrojů strojového učení.

3.1 Historie expertních systémů

Umělá inteligence, z jejíž poznatků expertní systémy vycházejí, prodělala od svého zrodu v druhé polovině padesátých let bouřlivý vývoj než se dostala na úroveň, na které je dnes a ani poté se její vývoj nezastavil. Ba naopak spíše ještě zrychluje [3].

V roce 1956 na konferenci v Dartmouth College, v New Hampshire formuloval John McCarthy termín "umělá inteligence". Na této konferenci se diskutovala myšlenka, že každý příznak inteligence lze popsat natolik přesně, že je teoreticky možno vytvořit stroj, který by ji simuloval [11].

V této době se předpovídalo, že v roce 1970 už bude umělá inteligence na takové úrovni, že bude schopna komponovat hudbu a rozumět přirozenému jazyku. Na konci 50. let navrhl John McCarthy programovací jazyk LISP jakožto první jazyk určený pro programování umělé inteligence. V 60. letech bylo čteně diskutováno jakých pokroků se dá v umělé inteligenci dosáhnout a koncem této dekády již bylo zřejmé, že se nepodaří dosáhnout cílů vytyčených v 50. letech [11].

Období 60. a první poloviny 70. let se tak nese ve znamení útlumu a stagnace na poli výzkumu umělé inteligence. Přesto však bylo dosaženo v tomto období několika nezanedbatelných úspěchů. Jedním z nich je rezoluční princip, který formuloval J. A. Robinson jako obecnou metodu pro odvozování vět v predikátové logice. A především byl v roce 1970 navržen jazyk Prolog, který je dodnes vyvíjen a využíván v mnoha oblastech umělé inteligence, včetně této diplomové práce. V 80. letech se ukázalo, že k řešení problému umělou inteligencí nepostačují znalosti obecného rázu, a že je zapotřebí, aby systém disponoval značnými znalostmi odbornými. Toto mělo za následek přesun pozornosti do oblasti expertních systémů. V 80. a 90. letech bylo vyvinuto a do praxe nasazeno velké množství expertních systémů, kterýžto trend pokračuje až do dnes [11].

3.2 Princip činnosti expertních systémů

Nežádka dochází k situacím, ve kterých je zapotřebí učinit rozhodnutí založené na základě kvalifikovaných znalostí a zkušeností. K vyřešení situace je tedy nutná přítomnost odborníka, experta v dané oblasti. Někdy vyžaduje problém znalosti z více oborů a je tedy zapotřebí, aby situaci řešili odborníci z více oblastí, což s sebou nese komplikace v podobě nutnosti synchronizování jejich vzájemné spolupráce a zavedení efektivní komunikace.

Mít k dispozici dostatečný počet patřičně kvalifikovaných pracovníků nemusí být vždy snadné a jejich absence může mít za následek neblahé dopady na projekt v podobě prodlužování termínů, prodražování, snižování efektivity a v neposlední míře snižování

kvality výsledného produktu, ať již je jí nějaký výrobek, či pouze informace vzešlá z rozhodovacího procesu.

Již od nepaměti existuje snaha nahradit manuální práci vykonávanou lidmi pomocí strojů, zautomatizovat rutinní úkony pomocí robotů a úkoly vyžadující repetitivní způsob myšlení pomocí počítačů. Stejně tak se s rozvojem algoritmů umělé inteligence dostávají lidem do rukou nástroje, které jsou v jisté míře schopny nahradit rozhodování kvalifikovaných expertů. Expertní systém lze tedy definovat jako počítačový systém hledající řešení problému v rozsahu určitého souboru tvrzení nebo jistého seskupení znalostí, které byly formulované experty pro danou specifickou oblast. Při řešení zadaných úloh využívá reprezentaci poznatků od expertů [12]. Jedním z obecně přijatých kritérií expertních systémů je, aby byl schopný učinit rozhodnutí rychlostí kvalitou vyrovnávající se nejméně průměrnému specialistovi [12].

Samozřejmě ne vždy je nasazení expertního systému možné či výhodné. Před rozhodnutím, zda pro řešení konkrétní situace vytvořit expertní systém, je zapotřebí provést analýzu řešeného problému z cílem zjistit, do jaké úrovně jsou znalosti, potřebné k jeho vyřešení reprezentovatelné pomocí nástrojů expertních systémů. Především je třeba zodpovědět následující otázky [12]:

- Jsou zručnosti, které používají specialisté, znalostmi, anebo jde o určité vrozené nadání (jako např. u provazolezců), nebo o určitými tradicemi, popř. rodinným prostředím zprostředkovaný vkus (např. u foukačů uměleckého skla, architektů apod.)?
- Dokáží si specialisté ze své oblasti osvojovat nové poznatky, resp. zvyšovat úroveň používání existujících poznatků i mimo vlastní praktické činnosti? Navštěvují školení a kurzy? Sledují odbornou literaturu?
- Existuje v oblasti, které se specialisté věnují, přiměřená odborná literatura?
- Mají poznatky specialistů své místo v některé oblasti vědy a techniky (např. zcela nové či nedostatečně zdokumentované obory)?
- Dokáží specialisté vysvětlit svoje profesionální rozhodnutí (například v situacích, kdy jsou voláni k zodpovědnosti za nějaký nezdar)?

Ani kladné odpovědi na předchozí otázky nezaručí, že nasazení znalostních technologií bude efektivní, nicméně existuje reálná naděje, že přinesou užitek. I tehdy je však vhodné mít na paměti některé z nejvýznamnějších výhod a nevýhod znalostních systémů [12].

- Mezi výhody expertních systémů patří bezesporu jeho dostupnost. Jakmile je vytvořen a nasazen, je k dispozici 24 hodin denně, sedm dní v týdnu. Nepotřebuje spánek, odpočinek ani dovolenou, navíc může být na více místech najednou.
- Je nedostižný v rychlosti rozhodování. Expertní systém dokáže realizovat řadu složitých výpočtů, zanalyzovat řadu možných eventualit během velice krátkého času a významně tak dopomoci v situacích kdy čas hraje rozhodující roli.
- Zpravidla také bývá levnější než placení lidských specialistů. Návrh a vývoj dobrého expertního systému sice bývá dlouhý a nákladný, nicméně z dlouhodobého hlediska stále může vyjít levněji než financování řady expertů.
- Expertní systém je výborným prostředkem jak zachovat znalosti, zkušenosti a obecně know-how experta odcházejícího z firmy. Ať už odchází do důchodu či zkrátka přechází ke konkurenci, ztráta zkušeného specialisty je pro firmu vždy obtíž a pokud je čas a prostředky k vytvoření systému, jež by byl schopný zastat jeho pozici (většinou alespoň částečně), pak to může pro firmu znamenat zmírnění ztráty.

- Za jistou výhodu by se v určitých situacích dal považovat fakt, že počítačové systémy "uvažují" na striktně racionální úrovni. Nejsou zatíženy břemeny tolik typickými pro lidskou mysl, jako emoce či svědomí. V důsledku této vlastnosti může systém doporučit řešení, ke kterému by lidský expert nedospěl, či lépe řečeno z emocionálních důvodů nechtěl dospět (např. v lékařství). V některých situacích může být absence emocionální zátěže výhodou, v jiných se naopak může proměnit v nežádoucí vlastnost.

Jistým důsledkem předchozí vlastnosti je také to, že expertní systém nikdy nepřehlédne důležitý fakt, neudělá chybu z nepozornosti.

Nesporným přínosem je i možnost využívat expertní systém jako "trenažér". Tím, že je schopen zdůvodňovat svoje kroky a výsledky, může sloužit jako školicí nástroj pro méně zkušené pracovníky a zvyšovat jejich kvalifikační úroveň [2].

I přes veškeré své výhody mají systémy počítačově zpracovávaných dat své (dosti zásadní) nevýhody.

- Především je to omezený způsob "uvažování", kterého jsou schopny dnešní počítače. Expertní systémy nemohou myslet kreativně, jejich výstupy, algoritmy, pomocí kterých byly vyvozeny a konečně i vstupní informace musejí být zadány a zpracovány ve formě exaktních dat. Pokročilé systémy sice mohou vyžít fuzzy logiky, neuronových sítí a dalších pokročilých metod umělé inteligence, stále se však jedná o striktně algoritmické uvažování.
- Z předchozího plyne neschopnost expertního systému reagovat na náhlou změnu situace. Tato ne-flexibilita může mít za následek, že systém nebude schopen vyvodit žádný závěr (či vyvodí zcela nesprávný) v případě, že se bude nucen rozhodnout v situaci, kterou tvůrci systému nepředpokládali, byť by taková změna mohla lidskému expertu připadat nepatrná.
- Velké nebezpečí spočívá v neschopnosti expertního systému rozpoznat, že se mýlí. Takový systém je schopen doporučit řešení, které by každý člověk okamžitě rozpoznal jako nesmyslné, zatímco počítačový systém považuje řešení za správné, neboť k němu došel na základě chladné logiky - například v oblasti medicíny vyvodit na základě symptomů závěr, že pacient je těhotný, přestože se jedná o muže.

Přestože znalostní systém může do jisté míry nahradit lidského experta, při návrhu a vývoji takového systému je naopak zapotřebí expertů nadbytek. Pro jeho vývoj musejí společně spolupracovat odborníci nejen z oblasti využití budoucího systému, ale také programátoři a počítačové experti. Přitom míra spolupráce musí sahát do takové hloubky, že programátoři musí (v ideálním případě) pochopit danou problematiku do dostatečné úrovně na to, aby byli schopni vyhotovit systém vyvozující relevantní závěry a naopak experti (například lékaři) musí být schopni chápat vyvíjený systém tak, aby poskytli informace relevantní pro jeho znalostní bázi.

Není tedy překvapením, že vývoj expertního systému je velice náročný jak po stránce finanční a časové, tak z hlediska lidských zdrojů.

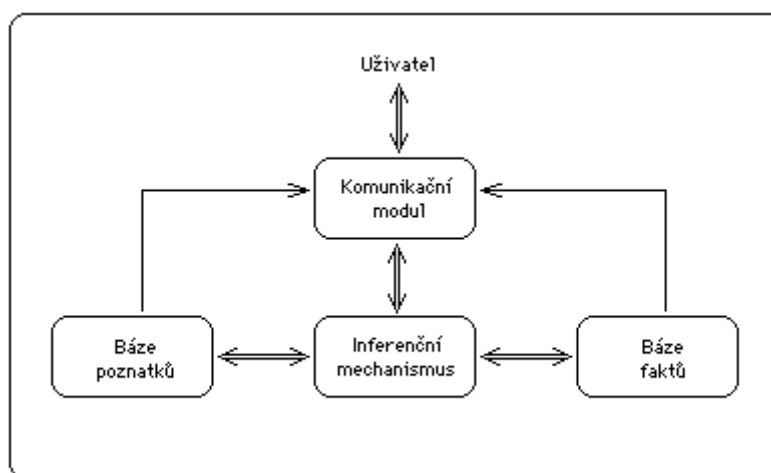
V neposlední řadě je to omezené spektrum situací, ve kterých je vhodné expertní systém implementovat.

Z uživatelského hlediska funguje hotový expertní systém na principu kladení otázek. Software klade svému uživateli sérii předem definovaných otázek za účelem zjistit jádro problému a zároveň tím získává informace potřebné pro kvalifikované rozhodnutí. Uživatel odpovídáním na položené otázky směřuje "tok uvažování" systému a zpřesňuje tak oblast, ve které se bude nalezené řešení vyskytovat. Nejčastěji je možno se setkat se stromovou strukturou (případně stromu podobnou - ve struktuře se mohou nalézat cykly) znalostní báze.

3.2.1 Architektura znalostních systémů

Stejně jako každý jiný netriviální systém i znalostní systémy se skládají z několika navzájem propojených a společně komunikujících prvků. Architekturu většiny znalostních systémů je možno rozdělit do několika následujících prvků [2]:

- Báze faktů (společně sází pravidel tvoří bázi znalostí)
- Báze pravidel (poznatků)
- Inferenční mechanismus
- Komunikační modul



Obr. 12 Architektura znalostních systémů. [12]

Báze faktů tvoří společně sází pravidel jakousi databázi znalostí, sesbíraných pomocí analýzy dané problematiky a reprezentující znalosti expertů. Zdánlivě bez jakékoliv souvislosti mezi nimi a taktéž bez instrukcí pro program, jak s těmito fakty zacházet. Do báze faktů bývají data zapisována nejen programátorem při tvorbě samotného systému, ale také data získaná za běhu systému vyžádáním od uživatele, dále pak různé mezivýsledky, výsledky apod. Počet těchto záznamů se nezřídka pohybuje v řádech tisíců. Báze faktů bývá během výpočtu mnohokrát používána a to nejen v případech, kdy program potřebuje při výpočtu získat nějaká data, ale je také možné (a běžné), že nová fakta jsou zapisována do báze faktů samotným programem, pokud je systém při svém výpočtu odvodí.

Pravidla, kterými se řídí zapisování znalostí do báze faktů má každý program pevně daná mezi jednotlivými systémy se mohou lišit.

Příklady faktů:

- ocel obsahuje železo
- papír může hořet
- rtuť je jedovatá
- apod.

V bázi pravidel jsou, podobně jako v bázi faktů, uloženy informace a poznatky (znalosti expertů) o dané problematice. Představují však především vztahy, které mezi jednotlivými fakty existují. Báze pravidel bývá většinou řádově chudší do počtu záznamů než

báze faktů a především bývá statická bez možnosti svého automatického rozšíření za běhu programu. Existují však i systémy, které toto umožňují a kde je tedy možné aby sám program do báze pravidel přidal zcela nové pravidlo, které odvodil. Pravidla jsou nejčastěji formulována ve tvaru „jestliže-pak“.

Příklady pravidel:

- **Jestliže** je odpad tříděný, **pak** je snadnější ho recyklovat
- **Jestliže** odpad obsahuje toxické látky, **pak** musí být zlikvidován patřičným způsobem
- **Jestliže** není možno odpad spálit **pak** je lepší ho skládkovat
- a podobně.

Inferenční mechanismus tvoří „inteligentní“ jádro systému. Je to odvozovací algoritmus, který na základě odvozovacích pravidel porovnává fakta a pravidla, přičemž se snaží najít taková pravidla, která odpovídají faktům obsaženým v bázi faktů. Podle těchto porovnání modifikuje bázi faktů takovým způsobem, aby našel požadované řešení.

V závislosti na tom, jakým způsobem jsou uložena (případně odvozená) data zpracovávána rozlišujeme dva základní typy algoritmů.

3.2.2 Dopředné řetězení

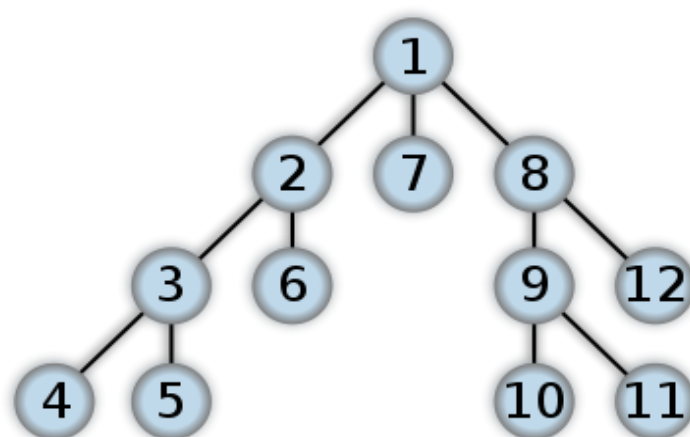
Dopředné řetězení (forward chaining) někdy také nazývané usuzování řízené daty analyzuje získaná data a postupně z nich vyvozuje závěr. Tato metoda je vhodná pro aplikace, kde předem známe většinu faktorů ovlivňujících rozhodování, ale neznáme závěr, např. navrhování konfigurace, plánování, konstruování, atd. Na počátku procesu jsou známa všechna data, tzn. fakta a pravidla (vztahy mezi fakty), která jsou zapotřebí pro vyvození správného závěru. Na základě vyhodnocování těchto dat jsou porovnávána pravidla s fakty, přičemž pro následné zpracování je vybráno to z pravidel, které má splněné předpoklady, tedy pravidlo, které „platí“ za použití porovnávaných fakt [2].

Algoritmus dopředného řetězení se skládá se tří neustále se opakujících kroků [2]:

1. Porovnání podmínky pravidla s položkami báze faktů.
2. Při nalezení více než jednoho vyhovujícího pravidla se modul rozhoduje, které z nich vybrat - dochází k tzv. řešení konfliktů .
3. Aplikace vybraného pravidla s následným přidáním nové položky do báze faktů (případně vymazáním existující položky) a návrat ke kroku 1.

Nežádka dochází k situacím, že je nalezeno více než jedno platné pravidlo. V takovém případě nastává tzv. řešení konfliktů, jehož algoritmy se významným způsobem podílejí na výsledné kvalitě systému. Způsobů jak řešit takové situace je velké množství. Těmi nejzákladnějšími jsou například:

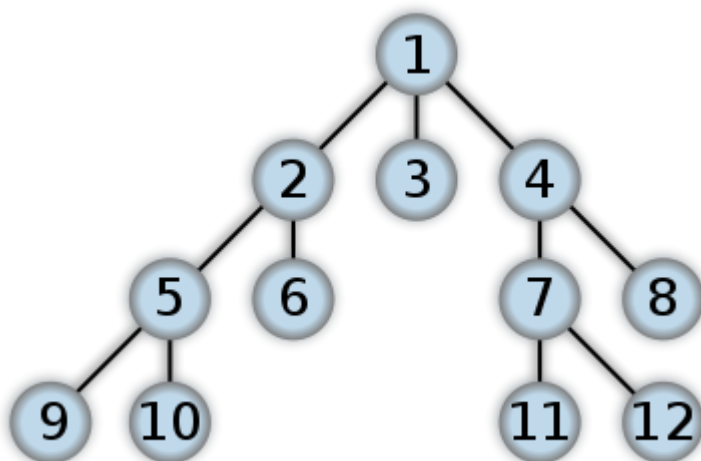
Strategie hledání do hloubky [11](depth first search) – z množiny platných pravidel se vybírá to, které bylo splněno pro nejaktuálnější data. Z hlediska teorie grafů se jedná o algoritmus vybírání pomocí tzv. zásobníku – LIFO (Last In, First Out). Obecně má tento algoritmus výhodu v tom, že postupuje přímočaře k cíli a zdánlivě má tedy potenciál dosáhnout výsledku rychleji než například algoritmus hledání do šířky (viz níže), ale hrozí tu riziko, že cíl, do kterého dospěje není ten správný a v takovém případě je zapotřebí vrátit se zpět a zopakovat hledání jinou cestou.



Obr. 13 Algoritmus hledání do hloubky. [11]

Stromový graf na obr. 13 zobrazuje hledání do hloubky, čísla reprezentují pořadí vybíraných uzlů. Jak je patrné, v případě, že uzel z číslem 4 je žádaným řešením, pak bylo cíle dosaženo relativně rychle. Pokud však je řešení obsažené v tomto uzlu z jakýchkoliv důvodů nevhodné, potom musí vyhledávání započít na novo a časová náročnost se tím stupňuje.

Strategie hledání do šířky [11] (breath first search) – dříve vybráno je to pravidlo z množiny platných pravidel, které bylo splněno pro dříve zpracovaná data. Tento algoritmus se využívá hledání pomocí fronty – FIFO (First In, First Out). Nepoužívá tolik aktuální data jako hledání do hloubky a postupuje k cíli pomaleji. Zato však zkoumá zpravidla více možností, postupuje pomaleji, ale „opatrněji“. V praxi to znamená, že z množiny možných voleb prozkoumá postupně všechny možnosti než postoupí o úroveň níž. Hledání do šířky je paměťově náročnější, než hledání do hloubky, protože prohledává úplně všechny možnosti současné úrovně stavového prostoru, (tzn. všechny možnosti), ze stejného důvodu je však zaručeno že vždy nalezne to nejvýhodnější možné řešení.



Obr. 14 Algoritmus hledání do šířky. [11]

Oba výše zmíněné algoritmy patří do skupiny takzvaného slepého prohledávání. Při rozhodování o tom, které pravidlo použít se totiž řídí předem definovanou cestou bez toho, aby měly jakoukoliv informaci o skutečné podobě (vhodnosti) vybíraných možnostech a proto jsou vhodné především pro menší stavové prostory. Při aplikování na velmi rozsáhlé systémy by prohledávání celého stavového prostoru bylo neúnosně náročné a je tedy vhodnější použít

některý ze sofistikovanějších algoritmů zahrnujících například heuristické metody.

3.2.3 Zpětné řetězení

Zpětné řetězení, neboli usuzování řízené cíli, začíná svůj cyklus v jednom z konečné množiny známých cílů a pokouší se dokázat jeho platnost (či neplatnost) na základě dat obsažených v bázi znalostí, případně sestavením nových pravidel a použitím jako podcílů. Tato strategie je vhodná pro diagnosticky orientované problémy, kde předem známe množinu možných cílů. Zpravidla je počet cílů mnohem nižší než počet vstupních parametrů.

Tento algoritmus postupuje podle následujících kroků [2]:

1. Utvoří se zásobník, který se vyplní všemi definovanými cíli.
2. Určí se všechna pravidla schopná splnit cíl na vrcholu zásobníku.
3. Tato pravidla jsou zkoumána a jedno z pravidel se následně vybere na základě postupu:
 - a) Jsou-li všechny předpoklady splněny, pak odvod' závěr (proved' pravidlo). Jestliže zkoumaný cíl byl koncový, pak jej odstrañ ze zásobníku a vrat' se na krok 2.
 - b) Jestliže to byl podcíl (dílní cíl), odstrañ jej ze zásobníku a vrat' se ke zpracování předchozího pravidla, které bylo dočasně odloženo.
 - c) Jestliže fakty nalezené v bázi faktů nesplňují předpoklady pravidla, je zkoumání pravidla ukončeno.
 - d) Jestliže pro některý parametr předpokladu chybí hodnota v bázi faktů, zjišťuje se, zda existuje pravidlo, z něhož by mohla být tato hodnota odvozena. Pokud ano, parametr se vloží do zásobníku jako podcíl, zkoumané pravidlo se dočasně odloží a přejde se na krok 2. V opačném případě se tato hodnota zjistí od uživatele a pokračuje se v kroku 3.a) zkoumáním dalšího předpokladu.
4. Jestliže pomocí žádného ze zkoumaných pravidel nebylo možné odvodit hodnotu důsledku, pak daný cíl zůstává neurčen. Odstraní se ze zásobníku a pokračuje se krokem 2.

3.3 Prostředky pro tvorbu ES

Expertní systém je specifický software, který je v posledních letech úspěšně nasazován na rozličné problémy, vyžadující rozhodování na základě mnoha kritérií, zpravidla striktně logického charakteru. Rozličná specifika expertních systémů a především pak způsob, jakým zpracovávají velká množství dat obsažených v jejich bázi znalostí, vyžadují sofistikovaný přístup k jejich tvorbě. Beze vší pochybnosti je možno je vytvářet v klasických, obecně známých programovacích jazycích jako C, C++ atd. nicméně v takových případech by bylo nutno vyvíjet zcela od začátku i základní nástroje, s nimiž expertní systémy pracují, jako inferenční mechanismus, napojení na bázi znalostí a podobně. Takovýto vývoj je velice nákladný a náročný a tak byly vytvořeny nástroje, potažmo celé programovací jazyky, které se svým charakterem hodí k tvorbě expertních systémů daleko lépe. Tyto jazyky využívají tzv. neimperativního (deklarativního) stylu programování. Výrazným rozdílem deklarativního programování oproti programování imperativnímu je způsob, jakým se definuje akce/výsledek, který programátor od softwaru požaduje.

V deklarativním stylu programování totiž ustupuje do pozadí otázka JAK dosáhnout daného cíle, tzn. provést výpočet, a programátor se zaměřuje pouze na to, CO má být dosaženo. Definovány jsou především vstupy a výstupy systému, přičemž program samotný je chápán jako funkce, resp. množina funkcí jejímiž parametry jsou právě zadané vstupy a které

vrací žádané výstupy. Dalším z významných faktorů, kterým se deklarativní styl programování odlišuje, je absence přiřazovacího příkazu. Tento zdánlivě nepodstatný rozdíl má na svědomí to, že programátor má mnohem menší možnost ovlivňovat jakým způsobem bude výpočtu dosaženo a na místo toho pouze určuje, co musí být splněno k dosažení kýžených cílů [3].

Deklarativní programovací styl je možno dále rozdělit na dva základní poddruhy, jimiž jsou programovací styl funkcionální a styl logický.

Principem funkcionálního programování je myšlenka, že program je tvořen posloupností vzájemně ekvivalentních výrazů, přičemž výpočet programu představuje jejich postupné zjednodušování a to až na úroveň výrazu, který jež není možno dále zjednodušit. Nachází se v tzv. normální formě. Základní operací je tedy zjednodušení výrazu. Při takovémto postupu zpravidla nezáleží na pořadí provádění jednotlivých operací, což s sebou přináší některé výhody, jako např. minimalizace vlivu chyby lidského faktoru či možnost provádět výpočty paralelně. Takový program neřídka využívá rekurzivních funkcí, které dovolují cyklení funkcí při zachování relativně malého objemu kódu [3]. Nejznámějším zástupcem funkcionálního programovacího stylu je jazyk LISP původně určený pro zpracovávání seznamů, který se ovšem rozšířil i do mnoha jiných oblastí. Využívá ho například grafický editor GIMP či kreslicí software AutoCAD.

Logické programování naproti tomu je postaveno na základě vyhodnocování výrazů - vzorů a cílů. Ve své podstatě se při programování v logickém stylu jedná o popisování problému pomocí faktů a pravidel, které popisují vztahy mezi objekty. Zdaleka nejvyužívanějším zástupcem z řady logických programovacích jazyků je jazyk PROLOG.

3.3.1 Lisp

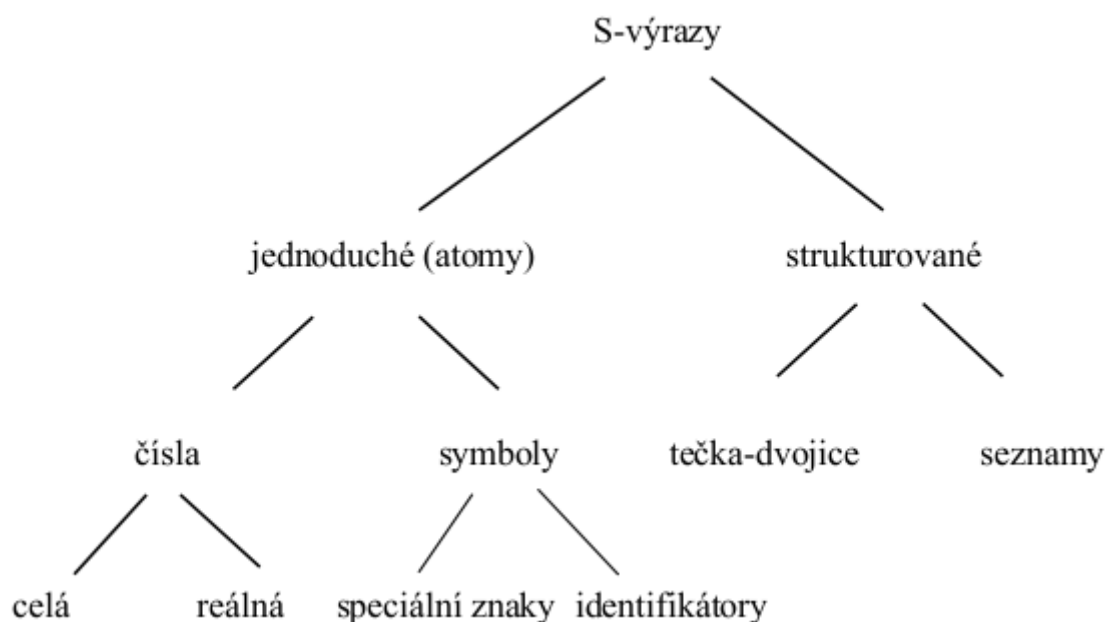
Programovací jazyk LISP sestavil na konci 50. let minulého století John McCarthy jakožto jazyk, určený ke zpracování seznamů. Odtud také pochází jeho název – LISP Processing. Jedná se tedy o jeden z nejstarších, programovacích jazyků, který se do dnešních dnů aktivně používá [7].

Jazyk LISP patří do skupiny funkcionálních programovacích jazyků od kterých si přináší některé charakteristické rysy (viz výše). Přesto však byla v průběhu času do Lispu implementována řada modulů a funkcí, které mají spíše imperativní charakter [10].

V době svého vzniku byl Lisp přelomovým jazykem, který změnil pohled na programování. Teprve v Lispu se poprvé objevil model podmíněného vyhodnocování if-then-else, který dnes chápeme jako samozřejmost. Jen pro srovnání, v té době silně využívaný jazyk Fortran obsahoval pouze podmíněný 'goto', který je dnešními programátory (po právu) tolik zavrhován. V Lispu se také poprvé objevila podpora rekurzivního cyklení [7].

Své původní určení manipulátoru seznamů již Lisp dávno přesáhl a nyní se s úspěchem nasazuje při vytváření algoritmů umělé inteligence. K tomuto účelu nahrává také skutečnost, že mezi jeho vestavěné datové typy patří symboly a (pochopitelně) seznamy.

Souhrnně se datové typy v Lispu nazývají takzvané s-výrazy, což je zkratka pro „symbolické výrazy“. Tyto se dále dělí strukturované, jimiž jsou tzv. tečka-dvojice a již zmiňované seznamy. Mezi jednoduché s-výrazy pak patří čísla, symboly, speciální znaky apod [3].



Obr. 15 Hierarchie datových typů v Lispu. [3]

Jednoduché s-výrazy, neboli atomy mohou být libovolná čísla (celá či desetinná), případně znaky a speciální symboly $+$, $-$, $<$, $>$, $*$, $=$. Mohou však také obsahovat identifikátory což je obdoba jmen proměnných a konstant z imperativních programovacích jazyků. Na rozdíl od nich však může být v Lispu přiřazena k atomům jak hodnota, tak funkce. Ty mohou být složeny z prakticky libovolné kombinace výše zmíněného. Např. „Promenna1“, „navez_atomu“ a podobně.

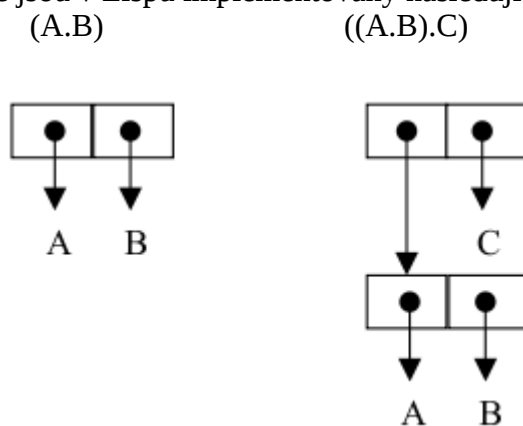
Relativně neobvyklým datovým typem je tečka-dvojice. Ten se skládá ze dvou s-výrazů, která spolu tvoří binární strom. Každým ze dvou prvků tečky-dvojice může být libovolný s-výraz, tedy nejenom jednoduchý atom, ale také jiná tečka-dvojice, což povede k vytvoření stromové struktury.

Příklad takové tečky-dvojice může být následující [3]:

```

(A.B)
((A.B).C)
((A.B).(B.C))
  
```

tyto tečky-dvojice jsou v Lispu implementovány následujícím způsobem.



Obr. 16 Reprezentace tečka-dvojic. [3]

Seznamy jsou reprezentovány řadou s-výrazů řazených za sebou. Opět, stejně jako v případě tečka-dvojic, i seznamy mohou být vnořené a prvkem seznamu tedy může být jiný seznam.

Například: (kov sklo plast) je tříprvkový seznam složený ze tří atomů. Naproti tomu seznam ((kov sklo) plast papír) je také tříprvkový, ovšem jeho prvním prvkem je seznam o dvou prvcích. Jak bylo psáno výše, aplikace funkce má charakter seznamu. Lisp toto chování dokonce implicitně předpokládá a tak pokud není stanoveno jinak vyhodnotí první prvek vloženého seznamu jako funkci, které pak jako parametry předá ostatní prvky v seznamu. Toto zdánlivě chaotické chování lze s výhodou využít pro rychlejší tvorbu operátorových akcí, neboť Lisp využívá prefixovou notaci. To znamená, že pokud chceme například sečíst dvě čísla, tak místo obvyklého zápisu „A+B“ použijeme „+ A B“. Ve výsledku tedy seznam (+ 1 1 1) vrátí hodnotu 3.

Přestože by se mohlo na první pohled zdát, že seznamy a tečka-dvojice jsou zcela odlišné datové typy, opak je pravdou. Seznam není v reprezentaci Lispu nic jiného, nežli tečka-dvojice napsaná ve zkrácené notaci. Jedním z prvků tečky-dvojice totiž může být speciální atom Nil, který značí prázdný prvek. Tečka-dvojice (A.nil) tedy může být zapsána jako (A) což už je seznam o jednom prvku. Jakýkoliv seznam pak nabývá podoby:

(A.(B.(C.(....(Z.nil)...))).).

Pro lepší názornost několik příkladů [3]:

Seznam	Tečka-dvojice ekvivalent
(A)	(A.nil)
(A B C)	(A.(B.(C.nil)))
(A (B C) D)	(A.((B.(C.nil)).(D.nil)))

Vlastní syntaxe v Lispu je relativně jednoduchá a krátká, nicméně využívá mohutně závorek (není výjimka mít jich šest či osm vnořených v sobě) a tak někdy Lispovský kód připomíná dlouhou řadu vnořených závorek, mezi které je tu a tam vepsaný nějaký příkaz. Tato vlastnost některé lidi od programování v Lispu odrazuje a činí problémy při programování zejména v méně uživatelsky přívětivých editorech, které nepodporují zvýrazňování párů závorek.

Program v Lispu se skládá z takzvaných forem, někdy též nazývaných také E-výrazy, neboť se jedné vyhodnotitelné (evaluable) s-výrazy. V podstatě mají podobu obyčejných s-výrazů, pouze s tím rozdílem že jejich „název“ neboli první prvek představuje funkci, kterou Lisp rozpozná a na základě toho vykoná s ostatními prvky – parametry- příslušnou akci. Funkcí je v Lispu definována celá řada a každá je specifická v tom, jakou akci provede s předanými parametry. Repertoár funkcí je jeden z nejvýraznějších rysů, kterým se od sebe odlišují jednotlivé dialekty Lispu. Například jedna ze základních funkcí je LIST. Ten z předaných parametrů vytvoří seznam a ten vrátí [3].

Dalšími z velice často používaných funkcí jsou například funkce FIRST -vrací první prvek seznamu, funkce REST -vrací zbytek seznamu (z historických důvodů nazývány někdy CAR a CDR), které se často používají ve vzájemných kombinacích a které tvoří nečekaně mocný nástroj v nejrůznějších úkonech.

Příklad použití některých funkcí [3]:

LIST:

(list 1 2 3) → (1 2 3)

CAR

(car '(A B C)) → A

CDR

(cdr '(A B C)) → (B C)

Apostrof ve zmíněném příkladě značí, že výraz za ním se má brát jako s-výraz, tedy nevyhodnocovat.

Mnoho funkcí v Lispu se dá spojovat dohromady s jinými pomocí zkrácené syntaxe. Např spojení CAR a CDR může vypadat následovně:

(car (cdr (X))) = (cadr X)

Kromě množství vestavěných funkcí, a jejich vzájemných kombinací existuje v Lispu také možnost definovat si funkce vlastní. K tomuto účelu slouží funkce DEFUN

(defun jméno-funkce (par1 par2 ... parN)

výraz1

výraz2

...

výrazM)

Speciální funkce DEFUN zajišťuje definování nových funkcí. Její hodnotou je jméno definované

funkce. Při aplikaci takto definované funkce se nejprve vyhodnotí argumenty a jejich hodnoty se navážou na proměnné par1, par2, ... , parN. Potom se postupně vyhodnocují výrazy uvedené v těle funkce a hodnota posledního z nich je výsledkem aplikace. Po skončení aktivace funkce se zruší lokálně platné vazby argumentů a obnoví se platnost vazeb z nadřazeného prostředí.

Ještě před tím, než si ukážeme příklad definice funkce, je zapotřebí zmínit jinou, velice užitečnou funkci, a tou je COND.

Funkce COND slouží jako jakýsi Lispovský ekvivalent If-Then modelu. Bere , stejně jako mnoho jiných funkcí, množství parametrů, nazývaných zde klauzule. Každá klauze se skládá z právě dvou E-výrazů. První z nich tvoří podmínku a druhý výsledek [9].

Funkce COND tedy vypadá následovně:

(COND

(podminka1 zaver1)

(podminka2 zaver2)

...

(T zaverN))

Hodnota, kterou nakonec COND vrací je získána tímto způsobem:

Pokud vyhodnocení podmínka1 je true (lépe řečeno, pokud je cokoliv jiného než nil), pak je vrácen zaver1. Jinak je vyhodnocena podmínka2 a pokud ta je něco jiného než nil pak je vrácen zaver2... a tak dále. COND tedy postupně vyhodnocuje podmínky dokud nenarazí na první s hodnotou různou od nil a její závěr pak vrátí. Pokud žádná z podmínek není splněna (všechny jsou nil) pak je vrácen zaverN, někdy též označovaný jako finální podmínka.

V jazyce Lisp bylo vytvořeno množství expertních systémů. Například Expertní systém Nexpert [30], nebo expertní systém pro diagnostiku závad na hydraulickém systému letounu CH-47 [29].

Jak je z výše uvedeného textu patrné, jazyk Lisp se výrazně odlišuje od klasických programovacích jazyků. Existuje ještě celá řada specifik a neobvyklých vlastností, kterými Lisp disponuje (je to na příklad jeden z mála jazyků, který může být napsán sám v sobě), a díky kterým se už více než půl století aktivně používá a vyvíjí.

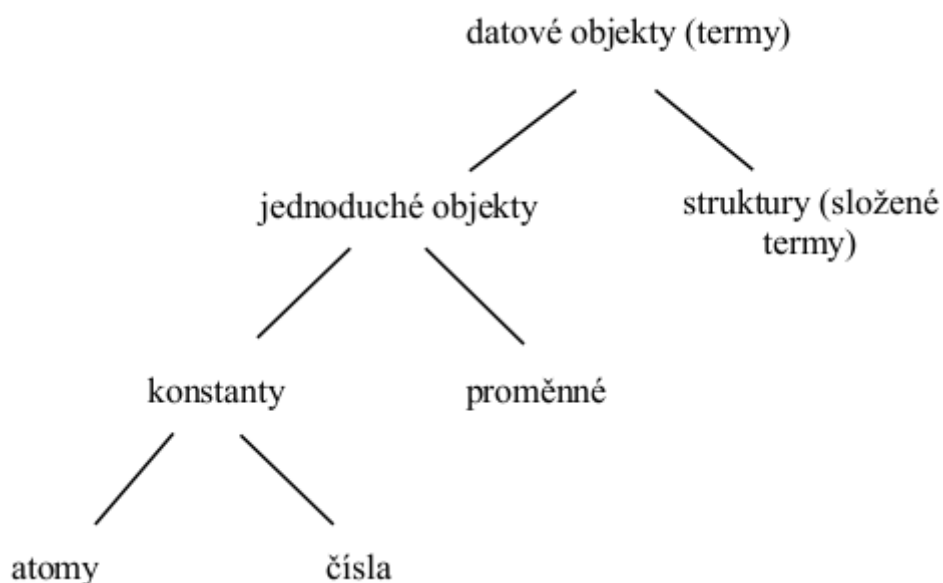
3.3.2 Prolog

Jazyk Prolog, jehož název je odvozen od "programation en logique" (programování v logice) vznikl v roce 1972 v rámci snahy vytvořit prostředek pro popis programu prostřednictvím vyjadřování v logice namísto psaní jednotlivých instrukcí. Jeho tvůrcem je francouzský informatik Alain Colmerauer. Původní účel Prologu byl strojové zpracování přirozeného jazyka (konkrétně francouzštiny) pro které se Prolog dodnes s úspěchem využívá. Nicméně stejně jako LISP i Prolog dalece překročil stín svého původního určení a v dnešní době se Prolog extenzivně nasazuje především při tvorbě systémů umělé inteligence.

Tento jazyk se dnes používá převážně pro programování umělé inteligence. Dá se však, díky své flexibilitě, použít i pro jiné úkoly než tvorbu AI. Velkou výhodou Prologu oproti Lispu v oblasti použití pro tvorbu expertních systémů je to, že Prolog je již vybaven vestavěným inferenčním mechanismem a není ho tedy nutno programovat zvlášť. Program v Prologu tedy může představovat jen bázi znalostí a bázi faktů [3].

Syntaxe jazyka s sebou nese významné rysy jeho původního účelu, je relativně jednoduchá a překvapivě podobná přirozenému jazyku. Vlastní průběh výpočtů v Prologu je založen na predikátové logice prvního řádu, která primárně řeší vlastnosti objektů, resp. vztahy mezi nimi.

Datové typy v Prologu se nazývají termy. Přehled a hierarchii datových objektů v Prologu ukazuje obr 6.



Obr. 17 Datové typy v Prologu. [3]

Základním datovým typem jsou atomy - v analogii ke klasickým programovacím jazykům by měly asi nejbližší ke konstantám. Atom může být téměř libovolný znak, musí však začínat malým písmenem, nebo některým ze speciálních znaků (*,+,./,...). Atom může také tvořit textový řetězec -např.: 'text', případně i číslo. V některých implementacích Prologu se může jednat i o reálná čísla. Prolog striktně rozlišuje mezi malými a velkými písmeny, neboť toto je jeho nástroj jak rozlišovat mezi konstantou a proměnnou. Proměnné jsou v Prologu reprezentovány pomocí identifikátoru začínajícího velkým písmenem, případně znakem „_“ - podtržítka. Znak podtržítka samotný má v Prologu svůj vlastní význam. Jedná se o takzvanou anonymní proměnnou, kterou lze použít tam, kde je hodnota dané proměnné irelevantní. Také způsob přiřazování hodnot proměnným se v Prologu liší od způsobu používaným v jiných jazycích. V Prologu hovoříme o vazbě proměnné na hodnotu spíše než o hodnotě proměnné. V praxi pak může proměnná nabývat dvou stavů [3].

1) Nenastavená proměnná - taková proměnná, která nebyla navázána na žádnou konstantu či strukturu jako svoji hodnotu

2) Nastavená proměnná – proměnné byla přiřazena konkrétní hodnota

Konstanty v Prologu tedy mohou vypadat takto:

256; a; konst; '25.03.2011'; ...

Zatímco proměnné takto:

Hodnota; A; _promenna; ABC; ...

Kromě těchto jednoduchých datových typů existují v Prologu také tzv. strukturované termy, neboli struktury či složené termy. Ty slouží podobnému účelu jako objekty a obecně by se dalo říci, že jsou tvořeny názvem „objektu“ (tzv. funktor) a množinou jeho atributů, kde počet těchto argumentů tvoří takzvanou aritu. Atom by se tedy dal považovat za funktor s aritou 0. Argumenty mohou být libovolné datové typy, včetně struktur.

Příklady struktur:

```
clovek(jmeno, vek, pohlavi)
odpad(druh(material, chem_slozeni, puvod), mnozstvi)
```

Z výše uvedených typů datových objektů se tvoří struktury - tzv. predikáty, které tvoří vlastní tělo programu.

- Fakta - vyjadřují tvrzení, která bezpodmínečně platí.
- Pravidla - vyjadřují tvrzení, která jsou platná při splnění určitých podmínek.
- Dotazy - inicializují výpočet programu, smyslem dotazu je zjištění, zda určité tvrzení platí či nikoliv.

Prostá fakta je možno v Prologu zapsat následovně:

```
ptak(kos).
ptak(orel).
savec(mys).
cerv(zizala).
ryba(treska).
plaz(zmije).
```

Nyní zavedeme vztahy mezi fakty:

```
potrava(mys, orel).
potrava(zizala, kos).
```

Tento zápis znamená, že myš je potravou orla, stejně jako žížala je potravou kosa. Obdobně bychom mohli pořadí "parametrů" v závorkách obrátit pro vytvoření vztahu 'lovec':

```
lovec(orel, mys).
lovec(kos, zizala).
```

Pořadí hodnot v závorkách je zcela na vůli programátora, nicméně jakmile je jednou zavedeno, je třeba jej striktně dodržovat, neboť se jedná o zcela jiný vztah.

Položení dotazu na výše uvedené vztahy vypadá takto:

```
?-potrava(mys, orel).
yes
```

kde "yes" je odpověď Prologu na položený dotaz zda myš je kořistí orla. Vzhledem k tomu, že přesně takový fakt byl definován, je odpověď kladná. Takto položená otázka neobsahuje žádnou proměnnou a má tedy pouze minimální míru použitelnosti. Mnohem užitečnější jsou dotazy s jednou či více proměnnými:

```
potrava(X, kos).
X = zizala.
no
```

Ptáme se, co je potravou kosa. Jak vidno, Prolog vyhodnotil výraz a do proměnné X

přiřadil (lépe řečeno unifikoval - viz níže) hodnotu 'zizala', kterou našel ve své bázi znalostí pod příslušným pravidlem. Odpověď 'no' v tomto případě znamená, že žádné další hodnoty odpovídající zadaným podmínkám již nebyly nalezeny.

Pravidla jsou v Prologu predikáty, které využívají logickou implikaci (značenou „:-“) k popisu vztahů mezi fakty. Příklad pravidla:

```
prcha(X,Y) :- potrava(X,Y)
```

Tento zápis znamená, že X prchá před Y, jestliže X je potrava Y.

Z výše uvedeného je patrné, že programování v Prologu se zásadně odlišuje od programování v klasickém (imperativním) programovacím jazyce. Výpočet programu v Prologu probíhá formou ověřování platnosti (dokazatelnosti) jednotlivých tvrzení, uložených v databázi (bázi znalostí), která je zároveň tělem programu. Aby toto bylo možné, je Prolog vybaven mechanismem, který umožňuje tzv. unifikaci výrazů. Pod pojmem unifikace si lze představit jakési sjednocení výrazů, jež mají některé společné rysy do výrazu, jež odpovídá oběma (případně více než dvěma) unifikovaným výrazům a sdílí tedy jejich společné rysy. Výsledkem unifikace je tedy výraz, který je obecnější nežli jeho předchůdci a otevírá tak cestu k dalším unifikacím [3].

Příklad unifikace [3]:

Výsledkem unifikace následujících dvou výrazů:

```
?-troujuhelnik(bod(1, 1), A, bod(2,3))= troujuhelnik(X, bod(4, 5), bod(2, Y))
```

je:

```
A=bod(4, 5)
```

```
X=bod(1, 1)
```

```
Y=3
```

Všimněme si, že v Prologu neznámá znak „=“ rovnost, ale je použit právě pro operaci unifikace.

Obecnější pravidla unifikace říkají, že jsou-li unifikovanými výrazy nastavené proměnné, pak k úspěšné unifikaci dojde právě tehdy, shodují-li se jejich hodnoty (lépe řečeno hodnoty, na které jsou proměnné nastaveny). Obdobně se musejí shodovat hodnoty unifikovaných konstant.

Je-li jedním z unifikovaných termů nenastavená proměnná, pak dojde k unifikaci a tato proměnná se nastaví na hodnotu druhého unifikovaného termu, ať již jím byl jakýkoliv term. Aby došlo k unifikaci struktur, musejí mít obě stejný hlavní funktor a jejich odpovídající si složky musí být unifikovatelné.

Výše popsané demonstrují následující příklady [12]:

```
?- p(X, f(Y), a) = p(a, f(a), Y).
```

```
X = a   Y = a
```

```
?- p(X, f(Y), a) = p(a, f(b), Y).
```

```
No
```

Jak je vidět, v prvním případě došlo k úspěšné unifikaci, zatímco ve druhém nebylo možné unifikovat všechny všechny složky tak, aby odpovídaly oběma unifikovaným výrazům. Konkrétně proměnná 'X' z termu 'p3' se nastavila na hodnotu konstanty 'a' z termu

'p4'. Dále proměnná 'Y' z termu 'p3' se nastavila na hodnotu 'b' z termu 'p4'. Při pokusu o unifikaci třetí, poslední položky došlo ke sporu neboť proměnná 'Y' je nastavena na hodnotu 'b' a tudíž nebylo možno ji unifikovat s konstantou 'a'.

Zpracování čísel

Prolog, vzhledem ke svému původu a účelu použití poskytuje pouze omezenou podporu matematických výpočtů ve srovnání s ostatními jazyky. Základní aritmetické operátory však zvládne. K dispozici jsou všechny základní operátory jako / , * , + , - , porovnávací operátory < , > , =< , >= , == , := , nechybí ani celočíselné a zbytkové dělení mod a div. Kromě těchto pracuje Prolog s vestavěným predikátem „is“. Ten by se dal označit za ekvivalent přiřazovacího příkazu [8]. Tedy:

```
X is 2 + 3
X = 5
```

Není však nutno se spoléhat pouze na vestavěné operátory. Prolog nabízí možnost definovat si operátory vlastní, včetně určení jejich priority nad ostatními. Takové operátory však pouze napomáhají k lepší čitelnosti kódu není s nimi spojena žádná operace, která by se měla provádět s příslušnými argumenty [3].

Nové operátory se dají definovat takto [13] :

```
Op(P, xfy, name) .
```

kde P značí prioritu operátoru. Jedná se o číslo mezi 1 a 1200 přičemž čím nižší číslo, tím větší má operátor prioritu. Všechny vestavěné operátory v Prologu už mají tímto číslem priority určené. Příznak „xfy“ značí, jestli je nový operátor infixový (xfx,xfy,yfx), prefixový (fx,fy), nebo postfixový (fx,fy).

Poslední položkou pak definujeme jméno našeho operátoru.

Priority vestavěných operátorů vypadají takto [13]:

```
Op(1200, xfx, ':-').
Op(1200, fx, [:-, ?-]).
Op(1100, xfy, ';' ).
Op(1000, xfy, ', ' ).
Op(700, xfx, [=, is, <, >, =<, >=, ==, :=] ).
Op(500, yfx, [+ . -] ).
Op(500, fx, [+ , - , not] ).
Op(400, yfx, [* , / , div] ).
Op(300, xfx, mod) .
```

Uživatelé definované operátory jsou výborným nástrojem jak přepsat prologovský kód do čitelnější podoby při zachování stejného významu. Řekněme, že máme následující pravidla zapsána v klasické prologovské syntaxi:

```
recyklovat_odpady :- kovy; sklo; plasty.
skladkovat_odpady :- popel, struska.
spalovat_odpady :- komunalni_odpad, not nebezbecny.
```

Použití častěji používaného a lépe srozumitelného zápisu ve formě

If podmínka then závěr

lze docílit definováním následujících operátorů:

```
: -op(800, fx, if).  
: -op(700, xfx, then).  
: -op(300, xfy, or).  
: -op(200, xfy, and).  
: -op(100, fx, ne).
```

Výše uvedená pravidla pak mohou být zapsána v následující podobě:

```
if kovy or plasty or sklo then recyklovat_odpady.  
if popel and truska then skladkovat.  
if komunalni_odpad and ne nebezpecny then spalovat_odpady.
```

Zpracování neurčitosti

V případech, kdy není vhodné, aby expertním systémem nabízená řešení měla formu jednoznačné informace, je možno vyjádřit je pouze jako odhady zavedením pravděpodobnostních koeficientů.

Předpokládáme, že stupně jistoty pravidel a faktů nabývají hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$.

Příklad pravidel pro jednoduchý systém zjišťující příčinu úniku vody [3]:

```
if hala_mokra and kuchyn_sucha then  
unik_vody_v_koupelne :: 0.8.  
if hala_mokra and koupelna_sucha then  
problem_v_kuchyni :: 0.9.  
if not dest or okno_zavrene then zadna_voda_zvenku :: 1.  
if problem_v_kuchyni and zadna_voda_zvenku then  
unik_vody _v_kuchyni :: 1.
```

Příklad dotazu:

```
?- certainty(unik_vody_v_koupelne, X).
```


4 EXPERTNÍ SYSTÉMY POUŽITÉ V OBLASTI ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

Zatímco expertní systémy vypomáhající při diagnostikování v medicíně a konstruování v nejrůznějších technických odvětvích začaly vznikat záhy po sestavení prvních expertních systémů jako takových, první systémy navržené pro účely environmentálního inženýrství se začaly objevovat až teprve o nějakých 15 let později. V druhé polovině 80. let Ortolano & Steinemann zdokumentovali 36 expertních systémů určených pro oblasti zpracování nebezpečných odpadů a kontrolu kvality odpadních vod [4].

Opožděné zapojení expertních systémů do otázek zpracování odpadů je zapříčiněno dvěma hlavními faktory. V první řadě obor environmentálního inženýrství je charakteristický svojí mnoho-oborovou povahou. Kromě specialistů na zpracování odpadů a ekologické otázky je často nutno povolát také odborníky z oblastí chemie, toxikologie, mikrobiologie, geologie a dalších vědních disciplín. Druhým faktorem je skutečnost, že díky velkému množství různorodých vstupů, které ovlivňují otázky managementu odpadů, je velice obtížné sestavit relevantní matematický model, který by dostatečně přesně aproximoval skutečné pochody.

Právě tyto faktory dělají paradoxně z této oblasti ideálního kandidáta na aplikaci expertního systému. Obtížné sestavování modelu bylo ovšem realizovatelné až s příchodem nových metod a nástrojů tvorby expertních systémů.

Produkce odpadů je problém, kterému se prakticky nelze vyhnout v jakémkoliv odvětví lidské činnosti. Ve většině vyspělých států světa je charakterizován rostoucí produkcí odpadních materiálů na osobu [26]. S rostoucím důrazem na ochranu životního prostředí a ostatní environmentální aspekty roste také tlak na rozvoj nových, efektivnějších technologií na odstraňování odpadu, snížení jeho produkovánosti množství a v neposlední řadě také na efektivní využívání těchto technologií. Nejmodernější technologie, jakkoliv mohou být šetrné k životnímu prostředí, nesou spolu mnohdy břímě v podobě vysokých nákladů na vývoj a v některých případech též na jejich provoz. Vysoké nároky na efektivitu zneškodňování, znovu využívání a omezování vzniku spolu s nezbytně vysokou mírou produkce odpadů udělaly z jejich zneškodňování lukrativní byznys pro jednu stranu, nákladný pro druhou.

Volba metod jak naložit s vyprodukovanými odpady má dalekosáhlé environmentální, ekonomické, ale i politické důsledky. Je proto zapotřebí přistupovat k takovému rozhodnutí s náležitou rozvahou a zvážit všechny rozhodující faktory.

Jak již bylo v této práci několikrát zmíněno, problematika využívání a likvidace odpadů je velice rozsáhlá a spadá pod široké spektrum vědních oborů. Netýká se pouze environmentálního inženýrství, ale také geologie, toxikologie, mikrobiologie, termomechaniky (především v otázkách spalování) a mnoha dalších. Do procesu výběru vhodných metod zasahují také ekonomické, politické a sociální aspekty.

Komplexní povahu celého rozhodovacího procesu je zapříčiněna velkým množstvím vstupních parametrů. Pro správný závěr je zapotřebí mimo jiné posoudit:

Rozličné technologické aspekty:

- Už jen směsný komunální odpad z domácností tvoří nesmírně bohatou heterogenní směs látek a materiálů, které je zapotřebí rozdělit, klasifikovat a zvážit způsob využití či likvidace každé z nich.
- Posoudit je také nutné nejen samostatné složky jako takové, ale také jejich koncentrace vůči celku.
- Odhalit a zohlednit přítomnost nebezpečných látek a zvážit možnosti jejich likvidace – některé lze za dodržení zvláštních okolností spálit (infekční látky), jiné je třeba

likvidovat jiným způsobem (látky výbušné).

- Využitelnost jednotlivých materiálů pro další zpracování je jeden z nejdůležitějších parametrů. Ať již pro výrobu druhotných materiálů recyklací, nebo pro výrobu tepelné či elektrické energie spalováním.

Ekologické parametry:

- Dopad na prostředí- netýká se pouze bezprostředních rizik jako únik nebezpečných látek do okolí (např. průsakem ze skládek), ale také další efekty jako šíření zápachy ze skládek, kouř ze spaloven a podobně.
- Revitalizace skládek – založení a provozování skládky je proces na desítky let a nekončí ani po jejím uzavření. Každou skládku je zapotřebí následně upravit a její okolí revitalizovat za konstantního monitorování a údržby po mnoho následujících let [14].

Nezanedbatelnou roli hrají také ekonomické aspekty, především pak investiční a provozní náklady.

Všechny výše zmíněné aspekty tvoří dohromady komplexní systém, k jehož správnému sestavení a interpretaci by bylo zapotřebí nutná spolupráce odborníků z několika oborů, aby rozhodnutí z něho vycházející bylo adekvátní. V situacích, kdy úředníci a manažeři zodpovědní za způsob zpracování odpadů nemají a ani nemohou mít potřebné znalosti a zkušenosti k dispozici, stejně tak jako nezbytné experty, přichází vhod počítačový expertní systém, který by mohl výše zmíněné znalosti nahradit.

4.1 Expertní systém pro odpadové hospodářství

Následující kapitola popisuje jak k problematice expertního systému určeného pro účely odpadního hospodářství přistupovali odborníci z Parson Engineering Science, Inc, a Department of Chemical Engineering, University of Tennessee.

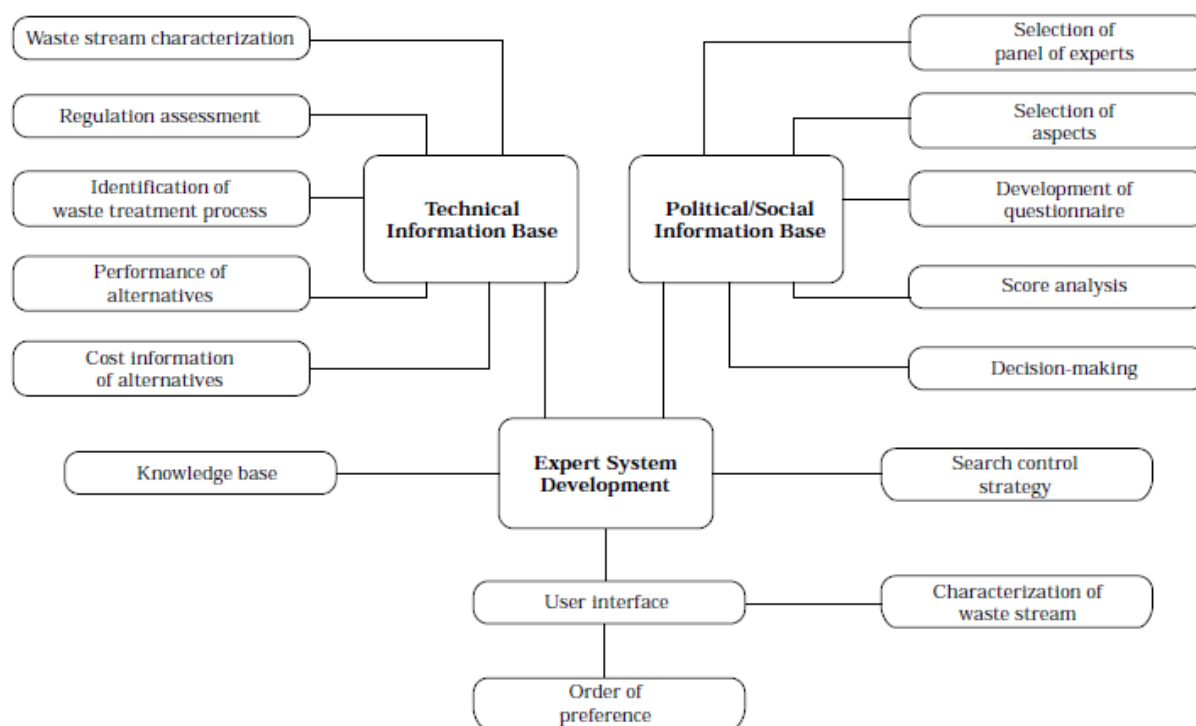
4.1.1 Přístup dle Wai & Weber [5]

Expertní systém, který vyvinuli Meng-Shuin Wei a Frederick Weber v roce 1995 se zaměřuje na problematiku likvidace nebezpečného odpadu v papírnickém průmyslu. Celý systém byl napsán v jazyce Turbo Prolog. Obsahuje dvě do značné míry samostatné báze znalostí, jednu pro ekonomiko-technickou část a druhou pro politicko-sociální aspekty. Obě báze znalostí byly od samotného systému odděleny tak, že v případě že bude třeba použít systém pro jinou oblast, stačí vyvinout novou bázi znalostí a jádro systému zanechat. Sekvence kroků pro zvolení metody zpracování vychází z modelu, který je rozdělen do sedmi kroků:

- 1) povaha odpadu
- 2) účel zpracování
- 3) technická vhodnost alternativ
- 4) ekonomická hlediska
- 5) environmentální hlediska
- 6) energetická hlediska
- 7) všeobecné vyhodnocení

Některé prvky výše zmíněného modelu byly drobným způsobem poupraveny aby vyhovovaly požadovaným účelům.

Pro výběr metod eliminování nebezpečných odpadů bylo definováno několik fází, přičemž každá z nich se skládá z mnoha kroků. Obr. 18 ukazuje tři z těchto fází.



Obr. 18 Schéma expertního systému dle Wai & Weber. [5]

4.1.2 Vývoj báze technických znalostí

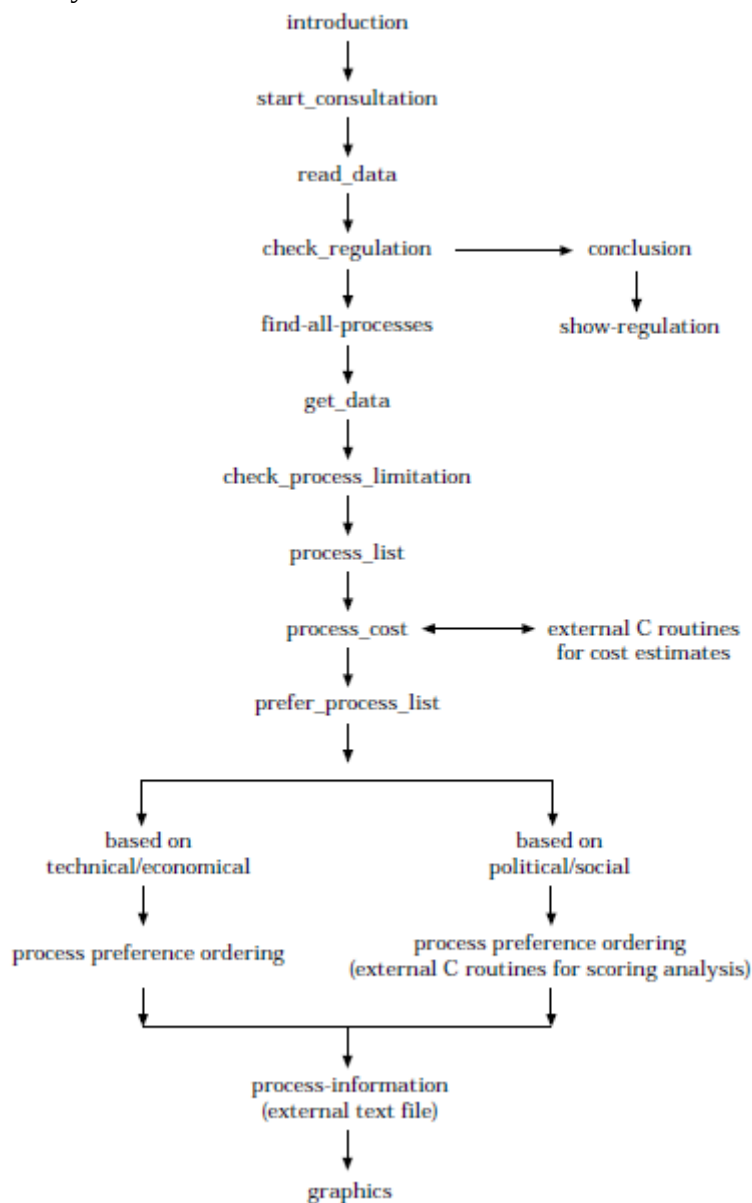
Tato báze znalostí obsahuje informace o procesech zpracování odpadů z hlediska fyzikálního a chemického. Jedněmi z nejdůležitějších jsou údaje o chemickém složení a koncentracích jednotlivých prvků v celkovém objemu odpadu. Nezanedbatelnou roli hrají také údaje o legislativních nařízeních, a informace o systémech zpracování už aplikovaných v praxi. Tyto údaje byly získány mimo jiné od EPA (Environmental Protection Agency), odborné literatury, prodejců zařízení, konzultace s odborníky atd. Získané informace o existujícím a v praxi používaném vybavení by se daly shrnout do následujících bodů:

- 1) Technické parametry.
- 2) Koncentrační limity pro používané technologie.
- 3) Obecné vybavení potřebné pro použití dané technologie.
- 4) Technický status a použití každé technologie.
- 5) Obecné výhody a nevýhody.
- 6) Investiční a provozní náklady každé technologie.

4.1.3 Vývoj báze politicko-sociálních znalostí

Získávání znalostí pro tuto fázi bylo obzvláště problematické, neboť se jedná o velmi nedeterministická a těžko kvantifikovatelná data. Řešeno to bylo rozesláním dotazníků každému z expertů, kteří se podíleli na vývoji systému a některým dalším specialistům na různá témata. Hlavním účelem bylo zjistit parametry pro ekonomické, environmentální a politické důsledky. Dotazník definuje kritéria pro výběr a obsahuje stručný popis možných alternativ. Zahrnuje také efektivnost, výhody a nevýhody metod, včetně nákladů a další informace, které pomohou dotazovaným specialistům v hodnocení jednotlivých alternativ.

Experti byli požádáni aby ohodnotili nabídnuté způsoby zpracování odpadů s přihlédnutím na výše uvedená kritéria. Výsledkem je hodnotící matice, která se pochopitelně může lišit u každého experta podle jeho znalostí a zkušeností. Pomocí multikriteriálních metod byly tyto matice sestaveny do jedné výsledné, dle které byly následně ohodnoceny jednotlivé metody zahrnuté v expertním systému.

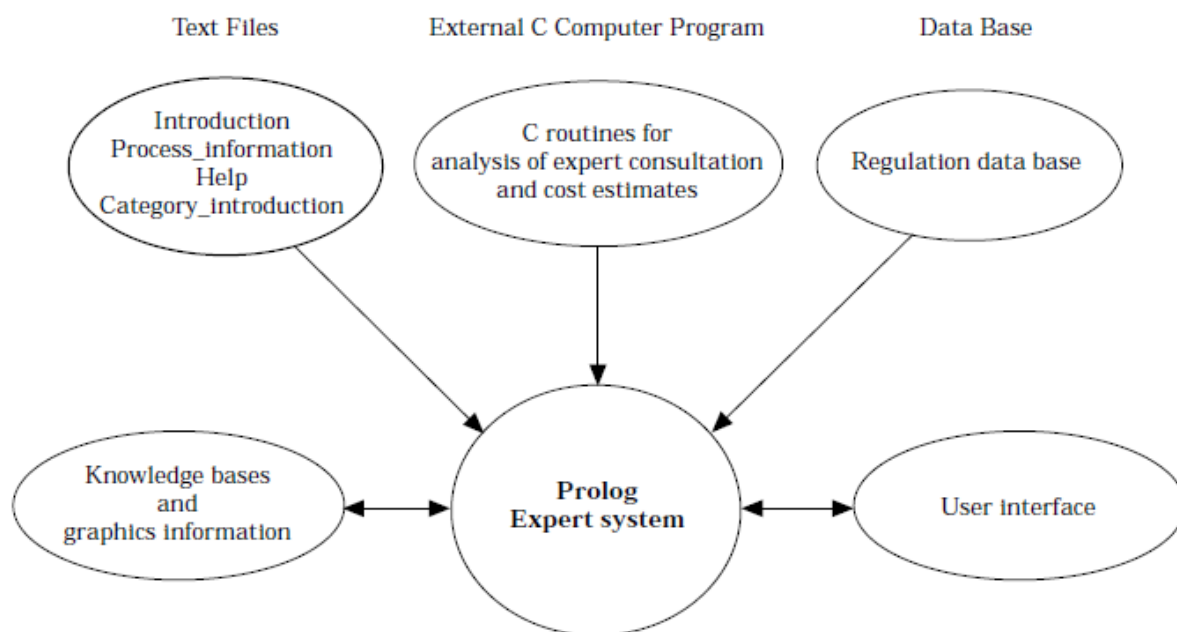


Obr. 19 struktura v Prologovské části systému. [5]

4.1.4 Vývoj samotného expertního systému

Nejrozsáhlejší částí systému, který vyvinuli Wei a Weber, byla analýza ekonomických ukazatelů. Byl napsán program v jazyce C, který tuto analýzu provádí, poté se přistoupilo k tvorbě samotného systému. Jeho hlavním účelem mělo být výběr jedné z existujících metod pro vyřešení problému odpadů, dále pak odhadnout finanční náklady na zvolené řešení a konečně také zahrnout výsledky z výše zmíněného dotazníku a porovnat s navrhovaným řešením.

Jak již bylo řečeno, expertní systém jako takový je psán v Prologu a také následuje klasický model pravidel ve formě IF-THEN výrazů. Prologovský model tvoří jádro expertního systému, zatímco externí rutiny psané v C obstarávají ekonomický odhad vybraných alternativ a analyzují výsledky z poznatků expertů. Implementováno bylo také grafické vykreslování grafů.



Obr. 20 Moduly Expertního systému dle Wai & Weber. [5]

Níže jsou uvedeny příklady dalších aplikací expertních systémů v oblasti zpracování odpadů, dále již jen stručně:

4.2 Výběr lokality pro skládku [7]

Prototyp expertního systému sestavený [Rouhani & Kangari] se zaměřoval na výběr vhodného místa pro založení skládky odpadů. Systém tvořilo několik na sebe navazujících úrovní jejichž báze znalostí byla postavena na základě hodnocení parametrů jako lokace a tok podzemních vod, lokální klima, charakteristika odpadu, funkce a možnosti plánované skládky, a maximální možná plánovaná rizika. Zdroj [4] ukazuje některé další možné přístupy k tvorbě expertního systému pro oblasti zpracování odpadů.

4.3 Výběr metod pro zpracování a recyklaci [4]

Téměř všechny druhy odpadu nejdříve projdou nějakým typem recyklačních procesů než budou uskladněny nebo spáleny či jiným způsobem zlikvidovány. Jejich alternativy by měly být zváženy z hlediska vhodnosti. Expertní systém RESREC vyvinutý společností Roy F. Weston, Inc. Pomáhá posoudit vhodnost těchto metod na základě množství a kvality zpětně získaného materiálu při zohlednění parametrů nákladnosti.

4.4 Výběr sběrných metod a systému transportu [4]

Expertní systém WAGS vyvinutý v roce 1991 pro United Nations Centre for Human Settlements (HABITAT) má za účel zvolit vhodné vybavení a systém pro sběr a transport tuhých komunálních odpadů. To zahrnuje způsoby sběru komunálního odpadu z domácností,

sběrná místa, typy vozidel pro transport, operační plány a možnosti údržby. Zatímco expertní systém se zabýval analýzou tohoto typu dat, konvenční program měl za úkol spočítat optimální trasy převozu s ohledem na cenu a další ekonomické aspekty.

5 PROSTŘEDKY POUŽITÉ K ŘEŠENÍ PROBLÉMU

5.1 WinProlog 4.900

Software LPA WinProlog 4.900 použitý pro tvorbu prototypu expertního systému v této diplomové práci je komplexní balík programů určených pro navrhování expertních systémů, naplňování bází znalostí, tvorbu uživatelského rozhraní a podobně [27].

WinProlog 4.900 je ve své podstatě, spíše než jeden kompaktní software, rozsáhlá sada nejrůznějších nástrojů, sloužících pro návrh a tvorbu logických rozhodovacích systémů, tzv expertních systémů (viz kap. 3). Některé z nástrojů byly přímo vyvinuty společností LPA (Logic Programming Associated), jiné byly pouze více či méně modifikovány a zahrnuty do balíku. Jádro celé sady programů, nástrojů toolkitů a utilit tvoří (jak již název prozrazuje) vývojové prostředí pro logický programovací jazyk Prolog. Verze obsažená ve WinProlog 4.900 je notně rozšířena o řadu modulů podporujících mimo jiné kompletní sadu Clocksinových a Mellishových predikátů, některé, v klasickém Prologu se nevyskytující datové typy (například datový typ string), Win32 grafické uživatelské rozhraní a další vstupní/výstupní prvky. WinProlog je také z větší části kompatibilní s Quintus Prologem, přestože velké množství součástí WinPrologu je vytvořeno čistě pro běh pod operačním systémem Windows a nedá se rozhodně označit za multiplatformní. Do WinPrologu je možno načítat a také z něho volat dynamické knihovny dll napsané v C/C++ či jiném programovacím jazyce, přičemž všechny datové typy mohou být předány Prologu a funkcím knihoven. Tyto také mohou Prologu kdykoliv zasílat zprávy, což umožňuje použití tzv. background processingu a mezi procesní komunikace [27].

Kromě těchto rozšíření jazyka Prolog obsahuje WinProlog také několik komplexnějších nadstavb z nichž s některými se seznámíme blíže.

5.2 Komponenty WP 4.900

5.2.1 Flex

Toolkit Flex patří do skupiny prázdných expertních systémů postavených na bázi rámců a pravidel, podporující dopředné i zpětné řetězení s vestavěným dotazovacím mechanismem. Součástí WinPrologovské implementace Flexu je vývojové prostředí obsahující běžné nástroje pro programování, jež jsou obvyklé i u jiných jazyků, jako barevné zvýrazňování syntaxe, debugger kódu apod. Flex je napsán ve WinPrologu a taktéž pod ním běží, není však problém mít spuštěné zároveň instance Prologu a Flexu a vzájemně jeden z druhého volat. Nedílnou součástí Flexu je KSL - Knowledge Specification Language, což je jazyk, na kterém Flex běží (jedná se de facto o modifikovaný Prolog, specializovaný pro daný účel) [27].

Flex je vestavěný subsystém, založený na principu dotazování, který umožňuje aplikaci komunikovat s uživatelem pomocí otázek a odpovědí a tím nejen získávat další informace potřebné pro správné rozhodnutí, ale také snižovat požadavky na kvalifikovanost koncového uživatele tím, že ho přirozenou cestou vede pomocí interaktivního dialogu.

Vzhledem k tomu, jak důležitá je znalost systému rámců a pravidel pro správné pochopení běhu Flexu, věnuji této problematice alespoň několik následujících řádek.

Rámce, neboli frames se dají přirovnat k objektům v objektově orientovaném programování. Rámce reprezentují jistou množinu situací, přičemž je snaha aby tato množina byla co možná nejobecnější. Obsahem rámce tedy není znalost o jednom jediném objektu, ale

o celých třídách objektů, znalosti platné pro většinu případů. Rámec je tvořen jménem a množinou atributů. Atribut (rubrika, slot) může dále obsahovat položky (links, facets), jako např. aktuální hodnotu (current), implicitní hodnotu (default), rozsah možných hodnot (range). [4] Krom výše zmíněného může slot obsahovat i speciální procedury, které mohou být připojeny ke kolekcím rámců, jednotlivým rámcům, nebo slotům. Tyto procedury zůstávají neaktivní a jsou aktivovány až případě, že nastane předem definované situace. Ve Flexu jsou k dispozici tyto čtyři typy datově řízených procedur [4]:

- launches (aktivují se při vytváření instance rámcu)
- watchdogs (aktivují se při přístupu k aktuální hodnotě slotu)
- constraints (aktivují se před změnou hodnoty slotu)
- demons (aktivují se po změně hodnoty slotu)

Stejně jako v případě objektově orientovaného programování, i rámce tvoří zahnížděnou (nested) hierarchii a dovolují předávat vlastnosti mezi rámci pomocí mechanismů dědičnosti.

Příklady rámců:

Jméno: Trideny_odpad
 Specializace čeho: odpad
 Druh:rozsah: (sklo, papír, plasty)

Jméno: Sklo
 Specializace čeho: Trideny_odpad
 Druh:rozsah: (bílá, barevná)

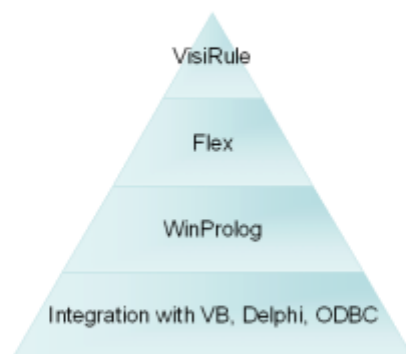
.

Rámec „Sklo“ je tedy specializací (v terminologii objektově orientovaného programování bychom řekli potomkem) rámce „Tříděný_odpad“, který je zároveň specializací rámce „odpad“. Mohou tedy existovat rámce jak specifické, týkající se pouze jediné konkrétní instance, tak také rámce generické, zahrnující velké skupiny entit. A stejně jako v případě objektů, i pomocí rámcové struktury lze předávat informace z jedné úrovně hierarchie na druhou bez nutnosti jejich zdvojení.

5.2.2 VisiRule [27]

Visirule je grafická nadstavba nad systémem Flex, umožňující podstatně komfortnější vývoj rozhodovacích systémů za použití plně grafického uživatelského rozhraní. Pomocí tohoto nástroje je možno skládat fakta, výrazy a dotazy, které jsou následně namapovány do pravidel. VisiRule nevyžaduje rozsáhlé znalosti programovacích jazyků, nad kterými je postaven, neboť je primárně zaměřen na uživatele s minimální znalostí programování, což je jeho velká výhoda, ale zároveň také největší slabina. Možnosti při tvorbě softwaru, přestože jsou stále velmi široké, jsou přece jen v jistých směrech omezeny a především pak tvorba velmi rozsáhlých systémů s mnoha fakty a pravidly se stává problematickou z důvodu nízké přehlednosti rozsáhlého stromového diagramu. Na druhou stranu je nutno podotknout, že právě při tvorbě velmi rozsáhlých procesů přijde vhod schopnost VisiRule importovat části kódu napsaného ve Flexu/Prologu či dokonce v téměř libovolném jiném programovacím jazyce a není tedy nutno tvořit celý systém pouze prostřednictvím VisiRule.

A Multi-tiered Toolset



Obr. 21 Hierarchie nástrojů WinProlog 4.900 [27]

Typy inferenčních mechanismů ve VisiRule

V praxi existuje několik typů problémů, které může expertní systém zpracovávat. Mnohé z nich vyžadují specifický přístup jak k tvorbě systému, který se jimi zabývá, tak jeho vlastní činnosti. V kapitole 3.2 byly popsány inferenční mechanismy dopředného a zpětného řetězení. Ve VisiRule byly specifikovány tři základní typy problémů, které se liší především typem rozhodovacího stromu. Ve VisiRule to jsou: klasifikační, diagnostický a konzultační. Níže jsou popsány rozdíly mezi nimi, a naopak také společné rysy.

- Konzultační systém
funkce: poskytnout radu nabídnutím vhodných možností, na základě zadaných faktů
příklad: navrhnout vhodnou lokalitu pro nákup nemovitosti na základě ceny, atraktivity okolí, potenciálu růstu ceny atd.
- Klasifikační systém
funkce: poskytnout vhodná fakta na základě požadavku daných jinými fakty a pravidly.
příklad: návrh konstrukce mechanického ramene dle požadované funkce, stupňů volnosti, nosnosti atd.
- Diagnostický systém:
funkce: poskytnout radu v při hledání příčiny problému, či výběru správné možnosti z omezené množiny předem známých řešení
příklad: zjišťování nemoci pacienta na základě symptomů, hledání příčiny závady auta, které nestartuje.

Ve skutečnosti by se dalo říci, že každý z těchto mechanismů je jistým druhem klasifikace. Konzultační systém klasifikuje možnosti na základě preferencí nebo faktů a diagnostický systém klasifikuje akce podle symptomů. Hlavní rozdíl mezi nimi je co klasifikují a na základě čeho.

Celý proces tvorby softwaru prostřednictvím VisiRule má podobu vkládání "uzlů", které reprezentují různé typy vkládaných informací a které mohou být několikerého typu.

Například je zde uzel pro fakta, uzel pro dotazy, uzel pro vyhodnocení podmínek a pod. Jejich detailní výčet bude následovat níže. Všechny uzly musí být vzájemně propojeny, přičemž způsob, jakým jsou propojeny reprezentuje vztahy mezi jednotlivými daty. VisiRule má zabudován systém hlídání nejen syntaktických, ale také některých sémantických chyb. V praxi to znamená, že je barevně zvýrazněna syntaxe zadávaných výrazů, stejně jako není možno realizovat propojení některých typů uzlů, vytvořit dvě identická propojení apod.

Typy uzlů:

1) **Start box** – tento uzel slouží jako výchozí bod pro každou aplikaci vytvořenou prostřednictvím VisiRule. Tento uzel má pouze výstup a nikoliv vstup. Jako parametr má pouze jméno. V programu se může vyskytovat i více než jeden startovní uzel, zpravidla jsou takto odděleny podsystémy navrhovaného procesu. Je označen zelenou barvou

2) **Question box** - uzel, který uvozuje dotazování programu na uživatele. Má tři parametry: Jméno, vlastní otázku a vysvětlení (pro upřesnění dotazu). Přísluší mu žlutá barva. Správné navržení struktury Question boxů v kombinaci s Expression boxy (viz. níže) je kriticky důležité pro správnou činnost systému, neboť přímo určuje, jak bude systém "uvažovat", jaké informace bude od uživatele požadovat a především k jakým závěrům na jejich základě dojde. Samotné question boxy se ve VisiRule dělí do několika kategorií rozdělených podle toho, jakého typu smí být odpověď:

- a) Question box s jedinou volbou - dovoluje uživateli vybrat právě jednu odpověď z několika nabízených možností.
- b) Question box s více volbami - dovoluje uživateli vybrat několik, případně žádnou z několika nabízených možností.
- c) Question box se vstupem pro číslo - poskytne uživateli pole, do kterého je možno napsat libovolné číslo.
- d) Question box se vstupem pro integer - poskytne uživateli pole, do kterého je možno napsat libovolnou celočíselnou hodnotu (integer).
- e) Set Input Question Box - poskytne uživateli pole, do kterého lze napsat seznam položek oddělených mezerami či čárkami. Tyto výrazy jsou následně vyhodnoceny a porovnány s položkami obsaženými v bázi znalostí.
- f) Name input Question Box - poskytne uživateli pole, do kterého lze napsat slovo, nebo fráze.

4) **Expression box** – tento zpravidla následuje po question box a reprezentuje uživatelskou odpověď na položenou otázku. Z logiky věci vyplývá, že v drtivé většině případů bude jeden question box propojen s několika expression boxy. Tento typ uzlu také slouží pro vyhodnocení hodnot, vypočítaných pomocí Statement boxů.



Obr. 22 Některé z typů uzlů.

4) **Statement box** - statement box, podobně jako Question box představuje otázku k zodpovězení, nicméně na místo vstupu od uživatele vypočítá výslednou hodnotu (odpověď) sám, pomocí kódu obsaženého v uzlu. Takto vypočtená hodnota je následně navázána na jméno příslušného Statement boxu. Opět má tři pole, které obsahují následující položky:

- jméno uzlu, na které bude po jeho vyhodnocení navázána hodnota vypočtené proměnné
- prologovský term (proměnná)
- prologovský kód, který obsahuje algoritmus k výpočtu hodnoty proměnné

5) **Code box** - obsahuje kód psaný v Prologu, případně ve Flexu. Může také obsahovat samotné volání na externí soubor obsahující kód. Code jsou mocným nástrojem, neboť mohou obsahovat i poměrně rozsáhlý algoritmus (napsaný v Prologu).

6) **Comment box** - tento typ uzlu slouží pouze jako pomůcka pro vývojáře pro psaní poznámek a komentářů ke specifickým částem programu. Nemá žádný vstup ani výstup a v grafickém prostředí VisiRule se od ostatních typů uzlů výrazně odlišuje tím, že kolem sebe nemá žádný barevný rámeček. Vypadá pouze jako text na zobrazený pozadí pracovní plochy vývojového prostředí.

7) **Continue box** - pomáhá udržovat rozsáhlejší diagramy přehledné rozdělováním na menší sekce, které je možno po pracovní ploše libovolně poskládat. Je to právě ten nástroj, který dovoluje rozdělit problém na podproblémy tím, že se použije na místo end boxu (viz níže) tam, kde dosažený závěr není konečný a následně pokračovat v analýze problému v samostatné, separátní větvi. Pokračování se zajistí použitím Start

boxu jednoduše tím, že Continue box, ve kterém došlo k přerušení má identické jméno jako start box, od kterého bude řešení pokračovat.

8) **End box** – tento červený uzel je konečným cílem uvažovaného procesu, reprezentuje rozhodnutí systému, učiněné na základě položení a zodpovězení řady otázek. Pochopitelně i end boxů je vždy několik, tak jako je několik (a většinou i mnoho) závěrů, ke kterým je navrhovaném problému možno dojít. End boxy tvoří listy stromové struktury diagramu, mají tedy vstup (případně několik vstupů), nikoliv však výstup.



Obr. 23 Typy uzlů ve VisiRule.

VisiRule dovoluje navrhnout a sestavit expertní systém jednoduchým způsobem a ve velice krátkém čase, což je velice důležitý faktor, rozbor problému odpadového hospodářství a následná akvizice dat se ukázala jako nesmírně časově náročná a tak se rychlost sestavení vlastního expertního systému dostala na přední příčky priorit.

5.2.3 Zpracování neurčitosti [27]

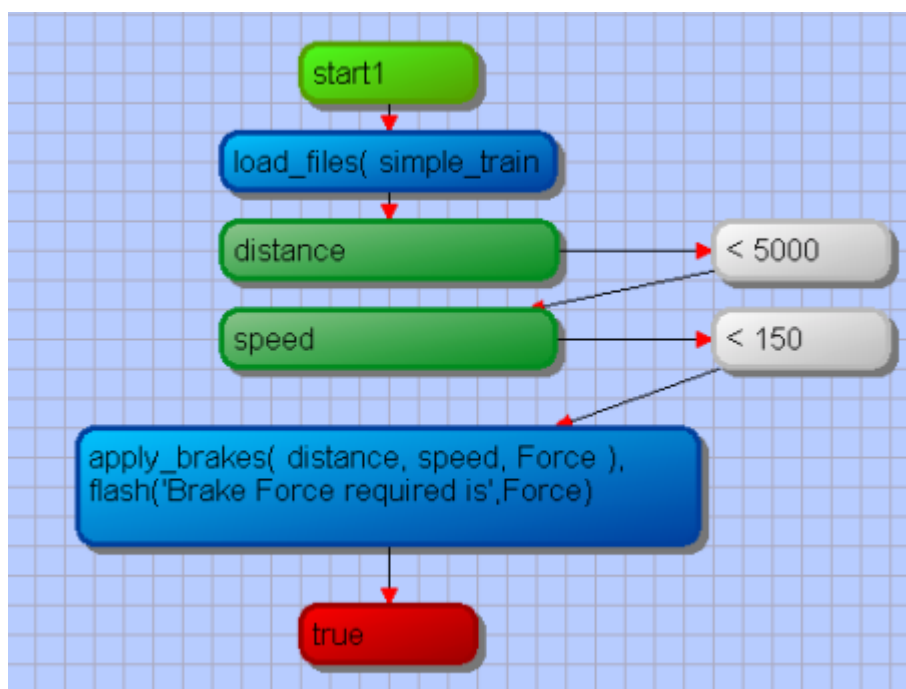
Problematika expertních systémů se nezdá zabývat úkoly, které lze jen obtížně popsat použitím exaktně vyjádřených dat. Do systému vstupuje velké množství informací, které nemusejí být vždy přesné, jednoznačně definované, či proměnné, jejichž hodnotu neznáme přesně a lze ji vyjádřit v nejlepším případě pomocí pravděpodobnosti. Existuje několik možností, jak k takovýmto problémům přistupovat. Jedním z nich je sestavení matematického modelu, jež bude aproximovat reálný systém a nahrazení nejistot zavedením koeficientů, konstant, proměnných a pravděpodobností, které následně umožní řešit problém prostřednictvím nástrojů exaktní matematiky.

Návrhu expertního systému by vždy měla předcházet rozsáhlá a zároveň podrobná analýza řešené problematiky, aby matematický model dostatečně přesně approximoval reálné chování systému. Sestavení takovéto analýzy je nejen nesmírně náročné jak po stránce časové, tak po stránce nároků na zkušené specialisty z daného oboru. Zároveň je relativně obtížné odhalit do jaké míry koresponduje matematický model s reálnou situací a zjistit relevantnost sestavených dat. Výše popsané nevýhody v mnoha propadech vyváží fakt, že sestavení dostatečně přesného matematického modelu umožní řešit problém pomocí rozsáhlé škály mocných matematických nástrojů, což výrazně usnadní práci s informacemi, daty, vztahy mezi nimi i následnou analýzu výstupu.

S rozvojem metod neexaktní matematiky dostáváme do rukou stále nové nástroje na řešení problému cestami, které byly dříve nedostupné. Jedním z takovýchto nástrojů je fuzzy logika.

VisiRule ve snaze udržet krok se stále nově vznikajícími požadavky na moderní přístupy implementovalo fuzzy logiku do repertoáru svých nástrojů a je možné ji při návrhu expertního systému používat [27].

Následující příklad ukazuje využití fuzzy logiky na jednoduchém problému aplikování vhodné brzdné síly na vlak, v závislosti na jeho rychlosti a vzdálenosti od požadovaného místa zastavení.



Obr. 24 Schéma triviálního systému využívající fuzzy logiku. [27]

K tomu, abychom mohli fuzzy proměnné používat, je zapotřebí je nejprve definovat a nastavit jim funkci příslušnosti. Toto můžeme realizovat v Prologu, jehož kód pak z VisiRule voláme.

Prologovský kód může vypadat třeba takto [27]:

```
:- ensure_loaded( system( flint ) ).
```

```
%%%%%%%%%
```

```
% Propagation of fuzzy values %
```

```
%%%%%%%%%
```

```
apply_brakes( BufferDistance, TrainSpeed, BrakeForce ) :-
```

```
    apply_brakes(      Method,      BufferDistance,      TrainSpeed,
```

```
    BrakeForce ).
```

```
apply_brakes( Method, BufferDistance, TrainSpeed, BrakeForce )
```

```
:-
```

```
    Method = bounded_range,
```

```
    uncertainty_value_reset( fuzzy ),
```

```

    fuzzify( buffer_distance, BufferDistance ),
    fuzzify( train_speed, TrainSpeed ),
    uncertainty_propagate( fuzzy, braking_matrix ),
    defuzzify( brake_force, BrakeForce, Method ).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Fuzzy variables %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fuzzy_variable( buffer_distance ) :-
    [ 0 , 1000 ] ;
    low, \, linear, [ 0, 500 ] ;
    medium, /\, linear, [ 0, 500, 1000 ] ;
    high, /\, linear, [ 500, 1000 ] .
fuzzy_variable( train_speed ) :-
    [ 0 , 150 ] ;
    low, \, linear, [ 0, 75 ] ;
    medium, /\, linear, [ 0, 75, 150 ] ;
    high, /\, linear, [ 75, 150 ] .

fuzzy_variable( brake_force ) :-
    [ 0 , 100 ] ;
    very_low, \, linear, [ 0, 25 ] ;
    medium, /\, linear, [ 25, 50, 75 ] ;
    very_high, /\, linear, [ 75, 100 ] .

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FAM - Fuzzy Associative Memory %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
uncertainty_matrix( braking_matrix ) :-
    buffer_distance * train_speed -> brake_force ;
    low * _ -> very_high ;
    _ * high -> very_high ;
    medium * medium -> medium ;
    medium * low -> medium ;
    high * medium -> medium ;
    high * low -> very_low .

```

Po spuštění výše ukázané struktury je uživatel dotázán na 2 vstupní hodnoty a na základě nich je vrácena výstupní fuzzy hodnota [27].

6 POPIS SYSTÉMU

Jak již bylo psáno výše, prototyp expertního systému vyvinutého v rámci této diplomové práce slouží jako ukázka různých přístupů k tvorbě takového systému a zároveň se snaží nalézt oblasti, kterým by měla být věnována bližší pozornost. Tomuto účelu byla podřízena jeho struktura a veškeré úsilí při akvizici znalostí. Celý systém je koncipován jako velice obecný, veškerá používaná data slouží jako demonstrace oblastí pro budoucí bližší analýzu a nemají za úkol aproximovat přesně reálnou situaci z praxe. Tento přístup byl zvolen z několika důvodů.

Prvním je již zmíněná komplexnost probírané problematiky. Obor odpadového hospodářství, natož pak expertních systémů určených pro tuto oblast je natolik rozsáhlý, že tvorba expertního systému určeného pro praktické použití jedním člověkem by se mohla ukázat jako neúměrně časově náročná a tudíž nesplnitelná v rámci daného časového rozsahu.

Dalším důvodem byl samotný sběr expertních dat. Již při počáteční analýze problému se ukázalo, že počet proměnných vstupujících do systému nejen že je enormně veliký, ale především velké množství potřebných dat jednoduše není k dispozici v ucelené formě. Stovky údajů, čísel, statistik, hlášení o produkci odpadů, výročních zpráv o plánech odpadového hospodářství a nespočet dalších informací by bylo zapotřebí sesbírat, seskládat, kategorizovat a implementovat do systému.

A konečně, praktický expertní systém by měl projít fází testování při částečném nasazení v praxi, dále náročnou fází ladění, kvůli zvýšení relevantnosti použitých dat, a tak dále. Jen tyto popsání činnosti by zabraly týmu expertů celé měsíce. Byl proto zvolen model, který spíše než praktické nasazení ukáže způsob, jakým by měl být takový systém koncipován, jaká data by měla být získávána a jakým způsobem využívána.

Snahou bylo vytvořit model zahrnující ekologicko-ekonomická kritéria, tak, aby výsledný systém poskytl vyvážený kompromis obou přístupů, neboť téměř vždy sedí technologicky a ekologicky vhodné řešení na přesně opačném konci spektra vhodnosti než řešení posuzované ze striktně ekonomického pohledu.

Zároveň byl kladen důraz na znovu využívání odpadních látek kde jen to bude možné.

Neuváženou likvidací odpadů přichází vniveč velké množství cenných surovin, které by mohly přinést užitek, tím spíše je vhodnější je využít, než řešit problémy s jejich likvidací. Nejedná se pouze o materiály recyklovatelné, jako kov, sklo, papír či plasty, ze kterých se pomocí recyklačních technologií opětovně vyrábí další materiály, ale také pro látky jež, přestože je není možno použít pro druhotnou výrobu materiálů, mohou dobře posloužit jako palivo pro výrobu elektrické nebo tepelné energie.

Vyvíjený systém se nezaměřuje pouze na odpad komunální, ale na veškerý odpad produkováný v dané lokalitě, to zahrnuje odpad produkováný výrobními i nevýrobními průmyslovými podniky, zemědělskou činností, čističkami odpadních vod, odpady produkovány poskytováním veřejných služeb, výrobou energií a podobně.

Expertní systém, který by mohl být sestaven na základě prototypu z této diplomové práce, je ve svém konečném důsledku určen pro vedoucí orgány v procesu rozhodování o nakládání s odpady, jako jsou starostové obcí, úředníci na příslušných postech a manažeři. Systém byl navrhován s důrazem na obecnost zpracovávaných informací tak, aby byl použitelný v široké škále aplikací, kde se rozhoduje o využití odpadu. Od obecních úřadů malých vesnic, až po magistráty velkoměst a snad také v managementu velkých podniků. V rámci rozsahu této diplomové práce byl kladen důraz především na technické otázky se zohledněním ekologických dopadů doporučeného řešení. Výsledný systém slouží pouze jako prototyp pro demonstraci možného přístupu k procesu rozhodování o vhodné metodě nakládání s odpady a zároveň také jako základ pro možná další rozšíření, přičemž je věnována pozornost tomu, aby byly ukázány směry, kterými by se tato rozšíření měla ubírat.

6.1 Sběr dat

Akvizice znalostí pro expertní systém tvoří nedílnou součást jeho tvorby. V tomto případě se dá téměř říci, že tvořila část dominantní, neboť vzhledem k tomu, že systém byl vytvářen jako obecně pojatý přístup, bylo nezbytné nejen nasbírat velké množství dat, ale především rozlišit, která data jsou relevantní, a která je možno ignorovat.

Velká část dat, získaných pro účely vznikajícího prototypu expertního systému byla získána ve spolupráci s RNDr. Jaroslavem Jíchou CSc. z ústavu procesního a ekologického inženýrství na Fakultě Strojního inženýrství VUT v Brně, který poskytl informace ohledně pravděpodobného složení a množství z různých typů lokalit, stejně jako mnohá jiná data, a se kterým byl pravidelně konzultován postup při vytváření rozhodovacího stromu.

Mnoho užitečných informací přímo z praxe z poskytl také Ing. Radek Veselý, který se rovněž podílel na podobě rozhodovacího stromu a dále poskytl informace týkající se kritérií vhodnosti jednotlivých metod zpracování odpadu. Poskytl také několik cenných podnětů týkajících se legislativy odpadového hospodářství.

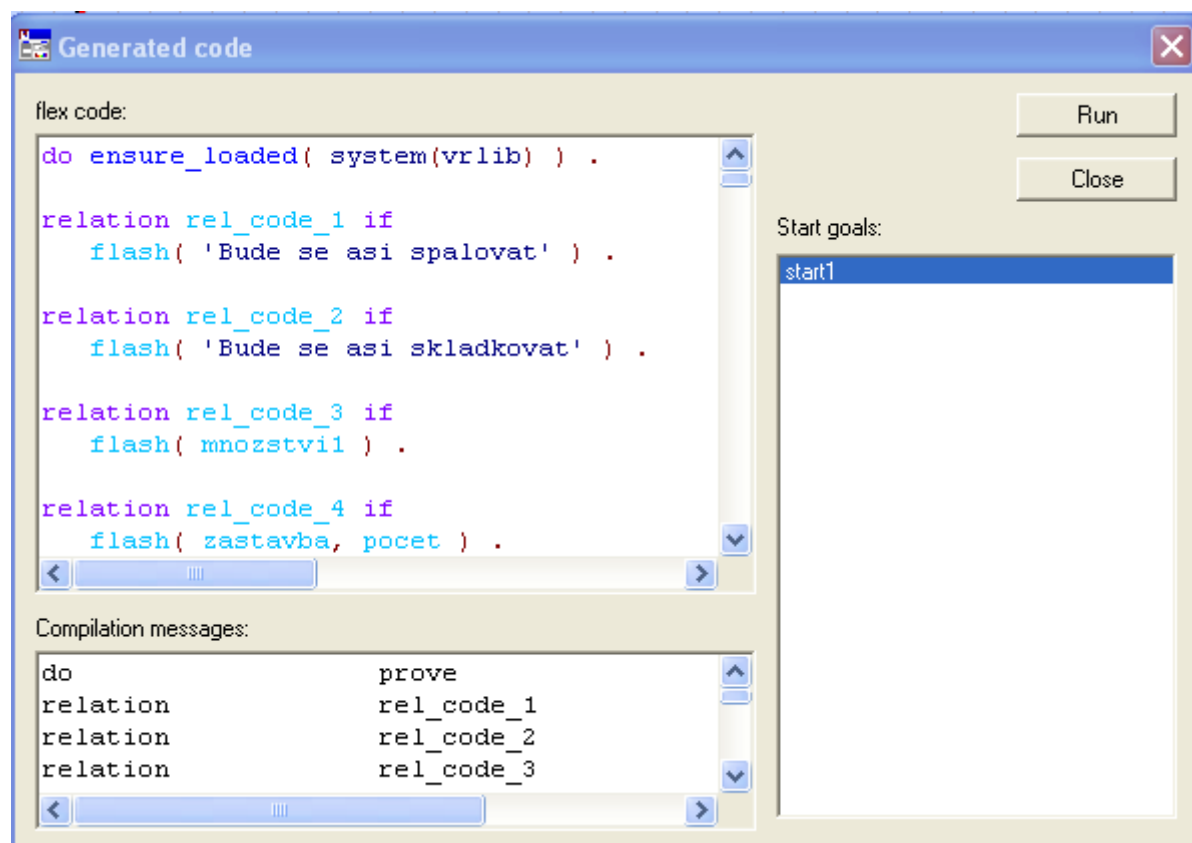
Další data byla získána studiem odborné literatury, vědeckých článků, a pojednáních o předchozích pokusech o tvorbu expertního systému pro účely odpadového hospodářství. O některých z nich pojednává kapitola 4. Pochopitelně nechybělo ani prohledávání internetu, přičemž byla samozřejmě věnována zvýšená pozornost důvěryhodnosti nalezených informací.

Z důvodu nesmírné rozsáhlosti problematiky odpadového hospodářství byl vyvíjen expertní systém koncipován jako ukázkový prototyp, který nastíní možnosti, kterými by se měl následný vývoj skutečného expertního systému ubírat a který poukáže na oblasti, ve kterých by měla být provedena bližší analýza a následný důkladný sběr dat pro bázi znalostí.

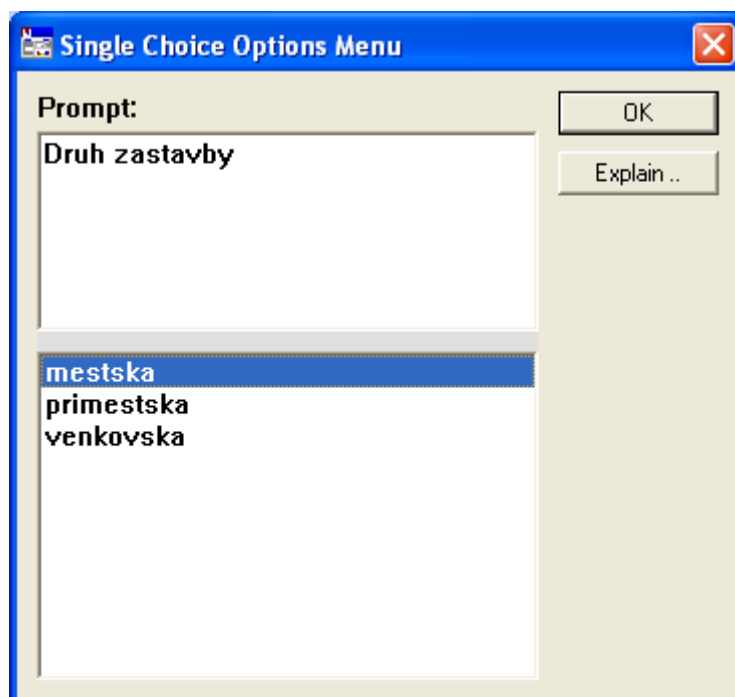
6.2 Komunikace s uživatelem

Tak jako mnoho jiných expertních systémů, i tento komunikuje z uživatelem prostřednictvím vedení interaktivního dialogu. Jak rozhodovací proces postupuje napříč rozhodovacím stromem, pokládá systém uživateli otázky tam, kde potřebuje doplnit nějaké informace neobsažené v bázi znalostí. Jedná se většinou o údaje specifické pro konkrétní aplikaci systému, jako jsou informace o velikosti a složení města, pro které je systém právě používán. Další otázky jsou například pokládány z výše popsaných důvodů obecnosti a v praktické aplikaci by byly nahrazeny údaji z báze znalostí získanými podrobnější analýzou, zatímco v tomto prototypu je to řešeno nabídnutím přibližné hodnoty, přičemž uživatel zvolí jednu nebo více vyhovujících možností.

Samotné ovládání systému je v poměrně intuitivní. Poté co je expertní systém spuštěn, objeví se dialogové okno, které obsahuje jednak základní ovládací prvky, jako tlačítka, seznamy atd, ale také vygenerovaný Flex KSL kód a výpisy kompilačních hlášení pro snadnější ladění programu.



Obr. 25 Okno s vygenerovaným Flex KSL kódem.



Obr. 26 Jednoduchý interface expertního systému.

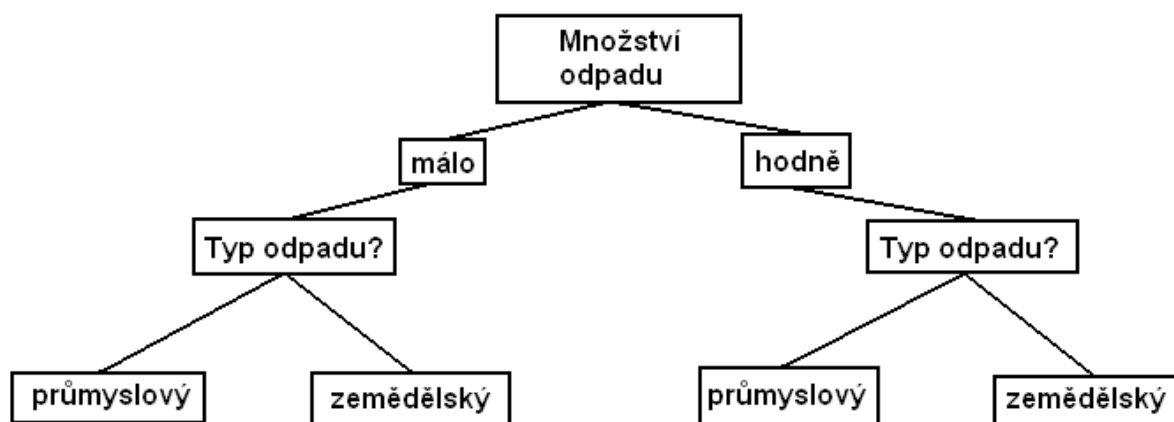
Kromě vlastního okna programu je na některých místech zajištěn aktuální výpis informací přímo po jejich zadání ve formě oznamovacího okna. Toto slouží převážně k snadnější orientaci uživatele při práci se systémem a zároveň ke kontrole zadávaných dat.

Systém průběžně informuje uživatele o postupu, pomocí vyskakovacích oken, kde například shrnuje volby, které uživatel učinil v rámci jednotlivých modulů (viz kap. 6.4) Tato oznamování jsou řešena pomocí volání prologovského kódu přímo z VisiRule, který načte hodnoty patřících proměnných a zobrazí je uživateli společně s dalšími vysvětlujícími informacemi.

6.3 Struktura používaných dat

Pro expertní systém je velice často vhodné, aby data, se kterými pracuje, resp. vztahy mezi nimi tvořily pokud možno stromovou strukturu. Její výhodou je to, že postupuje-li výpočet programu po stromové struktuře, tak jsou zpracovávána pouze ta data, která jsou relevantní pro aktuální postup a tudíž ne ta, která náleží do větví podstromu, do kterých se v daném průchodu stromem nepřistoupí. Toto ovšem platí pro rozhodovací stromy, nikoliv pro programy, kde se používá tzv. stavový prostor, který je nezřídka reprezentován právě stromovou strukturou. Problematikou efektivního prohledávání stavového prostoru se zabývá teorie grafů a zahrnuje mimo jiné heuristické metody (zmíněné v kap. 3.2.2), To je už ovšem mimo rozsah této práce.

V praxi se však stává, že požadavky na zadávaná či zpracovávaná data nesplňují přesně definici stromové struktury. Například pokud existuje série otázek, na které je zapotřebí dotázat se uživatele bez ohledu na to, k jakým (pod)závěrům se došlo na základě předchozích (stávajících, dosavadních) kroků, tzn. pokud je zapotřebí vykonat některé akce bez ohledu na to, v jaké části stromu se zrovna nacházíme.



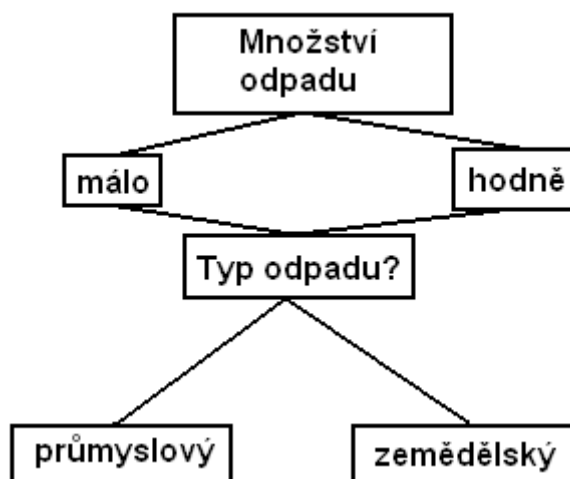
Obr. 27 Příklad stromové struktury.

Takovéto situace by při snaze zachovat striktně stromovou strukturu vyžadovaly zdvojení (či obecně několika násobení) uzlu a tím pádem přítomnost velkého množství redundantních dat, neboť by mohlo být zapotřebí zdvojit i celé rozsáhlé podstromy. Jak ukazuje příklad na obr. 27, v případě, že by se systém dotazoval na množství a zároveň na typ odpadu pro každou z možností množství (uvažujme pro zjednodušení, že množství odpadu je dáno pouze hodnotami „málo“ a „hodně“) bylo by nutno duplikovat uzly řešící typ odpadu tolikrát, kolik by bylo možných odpovědí na předchozí dotaz.

Ve VisiRule lze těmto komplikacím poměrně snadno předejít díky faktu, že v okamžiku rozhodnutí, kterého následníka aktuálního uzlu algoritmus zvolí, není zapotřebí vycházet pouze z informací z aktuálního uzlu. Při každém rozhodnutí jsou zvolené hodnoty uloženy a je možné je pak kdykoliv opětovně volat. K rozhodnutí je tedy možné volat výsledky rozhodnutí z libovolného předchůdce aktuálního uzlu, či jejich vzájemnou

kombinací, spojenou pomocí logických operátorů AND, OR, NOT a podobně. Dokonce lze informaci z aktuálního uzlu vynechat úplně a vycházet pouze z uzlu předcházejících.

Tato vlastnost umožňuje výrazně redukovat velikost výsledného stromu ve schématu systému a tím značně usnadnit jeho čitelnost.



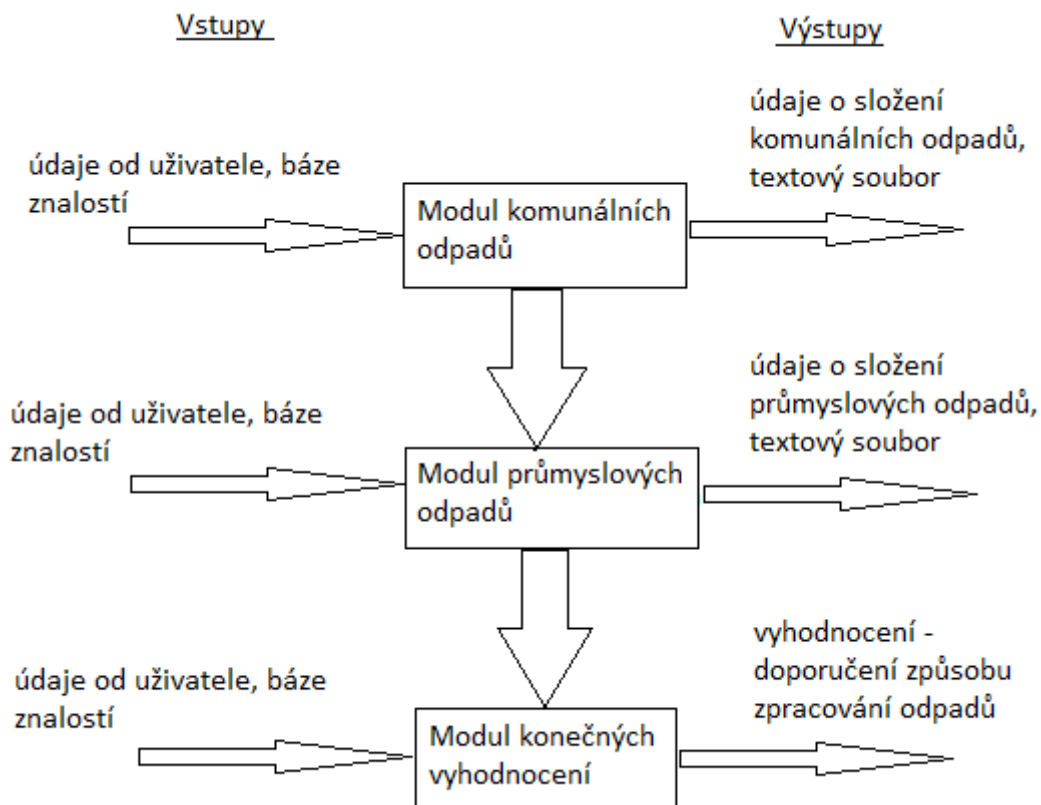
Obr. 28 Zredukováná stromová struktura.

Dalším případem, kde dochází k porušení definice stromové struktury jsou situace, kde rozhodování v jedné větvi podstromu může mít za následek rozhodnutí vedoucí k uzlu v jiné větvi. Na příklad pokud bylo rozhodnuto na základě informací o množství a složení odpadu, že technicky vhodné řešení by bylo spálení, nicméně některý z dalších uzlů, v podstromu spalování ukáže, že ekonomicky by bylo spálení krajně nevhodné a bude lepší odpad zneškodnit jiným způsobem (např. skládkováním). Dochází tedy k přeskokování mezi větvemi jednotlivých podstromů, což se neslučuje s definicí stromové struktury.

Ani takovíto uspořádání není ve VisiRule na překážku, neboť ryze stromová struktura (jakkoliv vhodná) není vyžadována.

6.4 Moduly systému

Celý systém je rozdělen do třech modulů, které na sebe přímo navazují a které obstarávají jednotlivé fáze rozhodovacího procesu. Tyto moduly jsou řazeny postupně za sebou a oddělují jednotlivé fáze analýzy odpadů do logicky spojených celků.



Obr. 29 Schéma propojení jednotlivých modulů

6.4.1 Modul komunálních odpadů

Prvním z nich je modul komunálních odpadů z domácnosti. Tato část systému analyzuje množství a složení směsných odpadů produkovaných domácnostmi přítomnými ve městě.

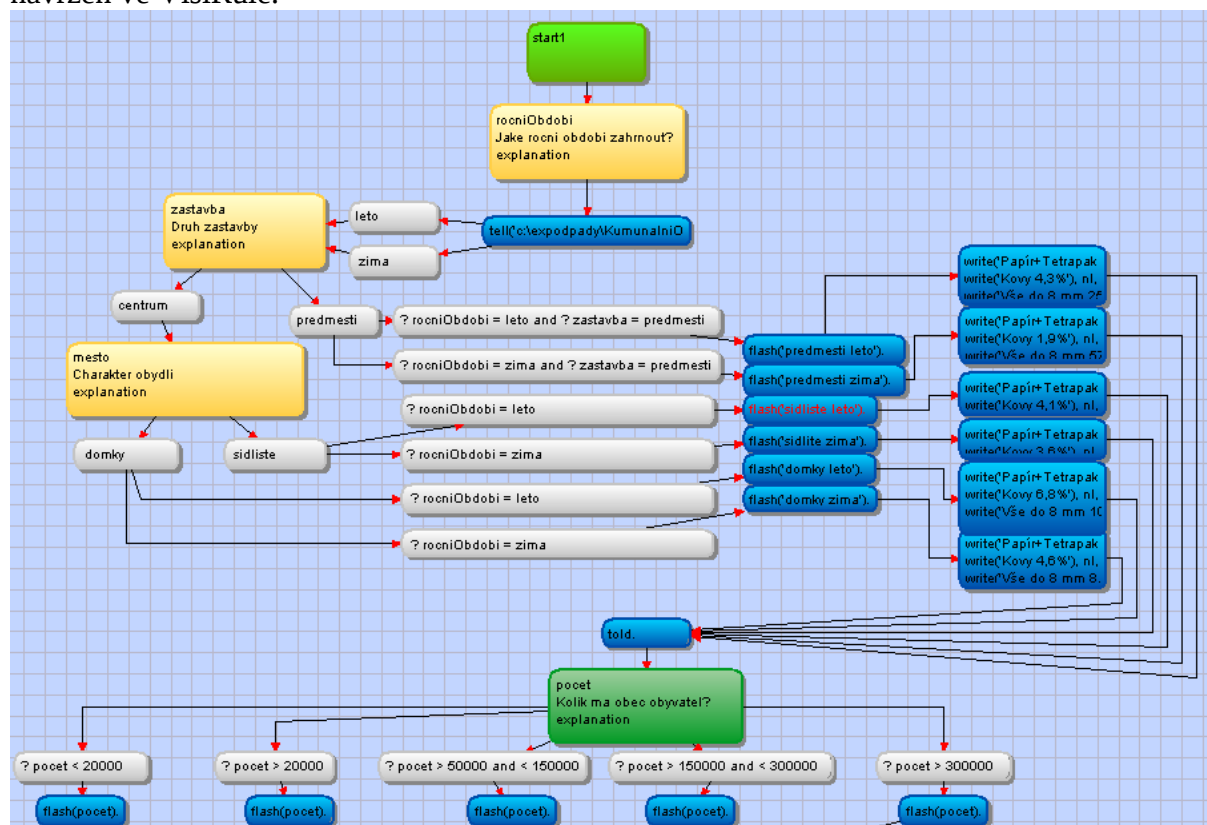
Jako vstupní údaje slouží především data jako velikost města, druh převažující zástavby – např. vesnická, kde převažují rodinné domky a hospodářská stavení, nebo městská s velkým počtem sídlišť a panelových domů. Tyto údaje nezanedbatelnou měrou ovlivňují složení odpadů, které tyto domácnosti vyprodukují. Dalším faktorem je roční období, za které byl odpad produkován. Například na vesnicích a předměstích, kde lidé stále používají k topení uhlí a dřevo je rozdíl mezi zimním a letním obdobím ve složení odpadu poměrně značný. Tato data byla nasbírána analýzou odpadů dodávaných do brněnské spalovny komunálních odpadů, přičemž byly uchovány informace, ze kterých čtvrtí daný vzorek pochází. Tyto informace byly implementovány do systému a tvoří součást báze znalostí. Pro každou kombinaci druhu zástavby a ročního období je přiřazen jistý procentuální obsah jednotlivých prvků dle nasbíraných dat.

Výsledkem této části systému jsou údaje o složení odpadu a přibližné zastoupení jednotlivých složek, které jsou pak dále postoupeny v rozhodovacím procesu a pomohou lépe určit vhodnou metodu, jak s takovými odpady naložit. Výčet jednotlivých látek spolu s jejich procentuálním obsahem je zapisován do textového souboru, jež je generován expertním systémem. Slouží pro případnou kontrolu či pozdější další zpracování. Hodnocenými složkami odpadů jsou:

- Papír
- Textil

- Plasty
- Kovy
- Sklo
- Minerální odpad
- Bio odpad
- Drobný odpad

Obr. 30 je screenshot části vyvinutého prototypu expertního systému tak, jak byl navržen ve VisiRule.



Obr. 30 Schéma modulu komunálních odpadů.

Velké modré boxy se starají o zápis informací do souboru, žluté představují otázky, které systém pokládá uživateli a šedé boxy jsou odpověďmi na tyto otázky. Odpovědi nemusejí být vyhodnocovány pouze samostatně (druh zástavby = centrum), ale mohou být sdružovány s odpověďmi na předchozí otázky pomocí logických spojek (druh zástavby = centrum AND charakteristika obydlí = sídliště). Do souboru je zapsáno složení odpadů, právě na základě takto složených odpovědí. Systém bere v potaz kombinaci ročního období a druhu zástavby a v případě, že druh zástavby je městský, tak ještě zohledňuje charakter obydlí (sídliště, rodinné domky).

Příklad složení komunálních odpadů ve formě procentuálního obsahu jednotlivých složek je vidět v Tab. 31, která ukazuje složení pro příměstskou část s množstvím rodinných domků pro letní období.

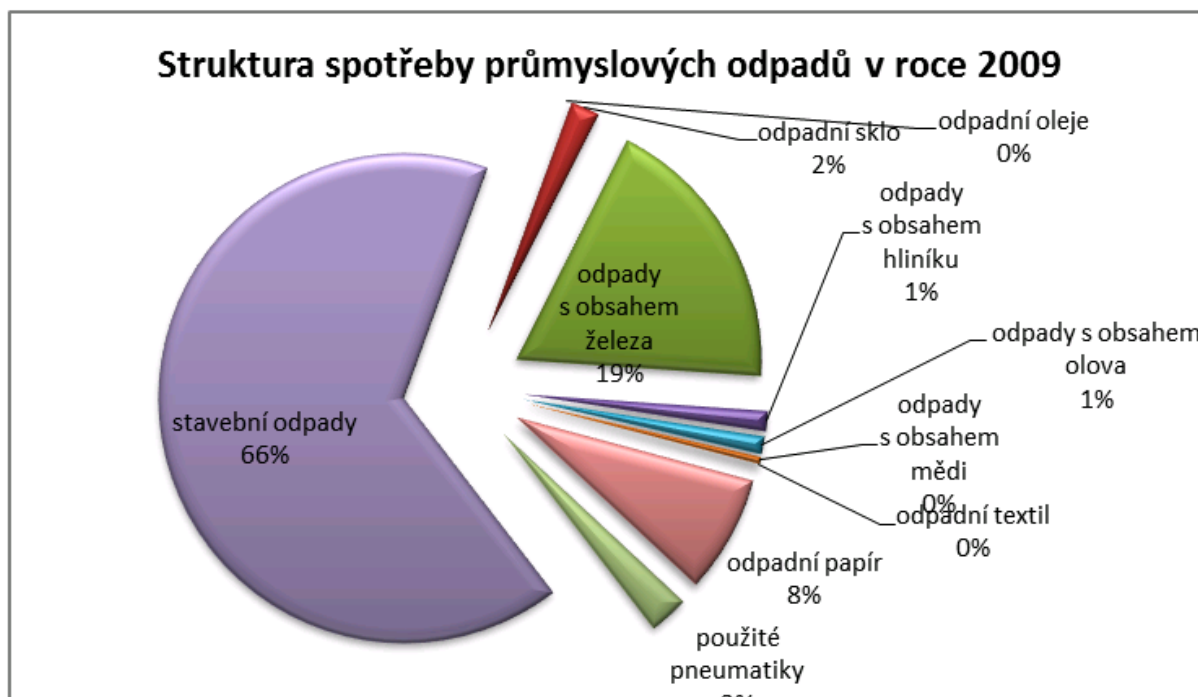
Příměstská - domky - léto	
Papír+Tetrapak	10.394
Textil	4.516
Plasty	11.426
Kovy	4.384
Sklo	4.857
Minerál. odpad	1.647
Vše do 8 mm	25.04
Bio. odpad	37.758
Celkem %	100

Obr. 31 Příklad složení komunálního odpadu.

Zatímco snahou výše zmíněných kroků je analyzovat odpad z hlediska jeho složení, tedy výskytu jednotlivých složek a jejich poměru k celkovému množství, informace, která dopomůže hrubě odhadnout celkové množství odpadu v absolutních číslech je údaj o počtu obyvatel. Tak jako na mnoha jiných místech tohoto systému, i tato čísla slouží jako demonstrace možného přístupu a bylo by vhodné je obdržet patřičnou analýzou, případně doplnit o možnost neurčitosti. - viz kap. 6.2.3.

6.4.2 Modul odpadů z firem

Odpady produkované domácnostmi, ať již tříděné či nikoliv, tvoří pouze zlomek z celkového množství odpadů produkovaných na území obce. Nezanedbatelnou část zastupují odpady produkované nejrozličnějšími průmyslovými, komerčními a zemědělskými podniky. Množství takto vyprodukovaných odpadů může být až několikanásobně vyšší než množství odpadů komunálních. Bylo proto zapotřebí tyto odpady do systému také zahrnout. Množství produkovaného odpadu v ČR dle údajů Českého statistického úřadu v roce 2005 ukazuje tab. 33.



Obr. 32 Složení průmyslových odpadů [27].

		Celkem	Nebezpečné	Ostatní
Podniková produkce odpadů		21 774	1 344	20 430
Z toho oddíl OKEČ				
Odpad ze zemědělství a lesnictví	01-02	463	5	458
Odpad z dolování a těžby	10-14	647	22	625
Průmyslový odpad	15-37	6 038	687	5 351
Odpad z energetiky (mimo radioaktivního)	40	2 309	35	2 274
Odpad ze stavebnictví	45	9 105	125	8 980
Odpad z dopravy	60	281	14	267
Odpad z odstraňování odpadních vod a pevného odpadu	90	1 150	388	762
Odpad z obcí		3 162	28	3 134
Z toho:				
Komunální odpad		2 954	17	2 937
Celková produkce odpadů		24 936	1 372	23 564

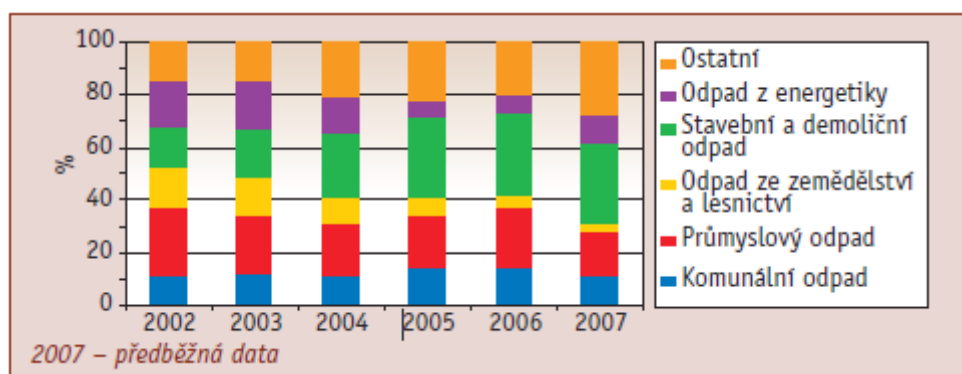
Obr. 33 Produkce odpadů podle vybraných oddílů OKEČ v roce 2005 (tis. t) – údaje ČSÚ [27].

Typy odpadů produkovaných těmito způsoby byly přibližně generalizovány aby poskytly představu o látkách, které se do odpadů dostanou vlivem činnosti výrobní i nevýrobní sféry, živočišné a rostlinné výroby, obchodní činností, veřejnými službami a dalšími komerčními aktivitami. Byly vybrány některé nejobvyklejší druhy průmyslové, zemědělské a obchodní činnosti a k nim byly přiřazeny odpadní látky, které tento typ činnosti vyprodukuje [27].

Systém se uživatele pomocí interaktivního dialogu nejprve dotáže, jaký druh průmyslu

je v lokalitě provozován a na základě toho vyvodí druhy látek, které bude s největší pravděpodobností odpad obsahovat. Druhy průmyslu byly vybrány následující:

- **strojírenský** – odpady tvoří převážně kovové, případně plastové materiály. Kovové zbytky z obrábění (třísky, piliny), dále pak použité chladicí kapaliny, řezné emulze, olejové filtry a pod.
- **hutní** – společně se stavebním je největší producent odpadu z pohledu objemu. Strusky, stěry, odpadní kaly, prachy, popel z výroby kovů. Případně obrusy, výseky, pokovovací lázně ze zpracování kovů.
- **chemický** – největší producent nebezpečného odpadu- toxické, reaktivní, hořlavé látky, průmyslové odpadní vody, plynné emise (SO_2 , SO_3 , NO_2 , H_2S , HCl), patří sem i petrochemické produkty, barviva, léčiva, pesticidy. Zpravidla kapalné a pastovité odpady.
- **stavební** – produkuje velké množství relativně neškodného a dobře využitelného odpadu. Demoliční stavební minerální sutě, cihelný, betonový, asfaltový recyklát, drtě, výkopová zemina, odpady ze stavenišť a pod.
- **těžební a ropný** – inertní materiály (zeminy), odpady z provozu a údržby velkých těžebních strojů, z vrtných prací (ropou kontaminovaná zemina), dopravou velkého množství materiálů, látky vznikající při zpracování ropy.



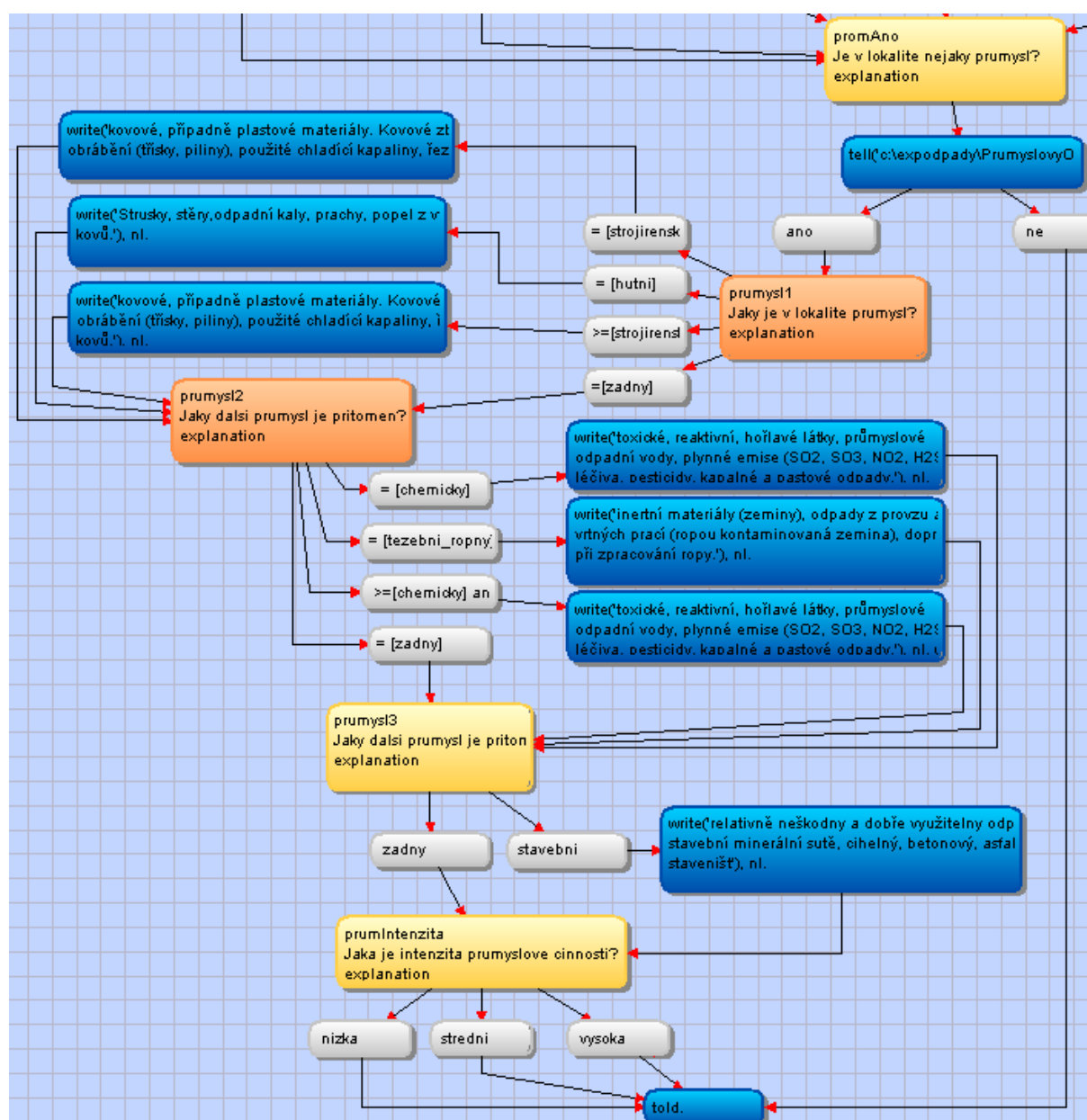
Obr. 34 produkce odpadů dle CENIA [28].

Odpady z průmyslu jsou specifické v několika pohledech. Předně převažuje jedno druhový odpad či několik málo druhů v jednotlivých průmyslových odvětvích. Dále se tu vyskytuje poměrně velké zastoupení nebezpečných odpadů (chemikálie), stejně jako odpadů recyklovatelných (kovy). V neposlední řadě, průmyslová činnost je největším producentem odpadů obecně a právě proto zde existuje největší snaha o omezování jejich vzniku a využívání těch, které byly vyprodukovány. V některých případech může být energetická úspora při využití druhotných surovin značná, jak ukazuje tab. 35 popisující spotřebu energie na výrobu 1 tuny materiálu.

Největší pozornost byla věnována průmyslovým odvětvím, které zatěžují životní prostředí nejvýrazněji. Mezi silně zátěžové patří například těžební a energetický průmysl, chemický, metalurgický a strojírenský. Na druhou stranu spektra naopak patří nízká zátěžová průmyslová odvětví jako dřevozpracující, či textilní průmysl.

	Z rudy	Z odpadu	% úspory energie
Al	65 000	2 000	97
Cu	13 500	1 700	87
Pb	9 500	500	95
Zn	10 000	500	95

Obr. 35 Spotřeba energie pro výrobu 1 tuny kovu z rudy a z odpadu v kWh/t. [28]



Obr. 36 Schéma modulu průmyslového odpadu.

Jak je patrné z obr. 36, systém se dotazuje uživatele na jednotlivé typy průmyslu (strojírenský, hutní, chemický, stavební, těžební a ropný), přičemž uživatel má možnost zvolit jeden či více možností, případně žádnou a dle toho systém vyhodnotí složení odpadů. Stejně jako v případě modulu komunálních odpadů i zde je výstupem textový soubor obsahující informace o složení odpadů.

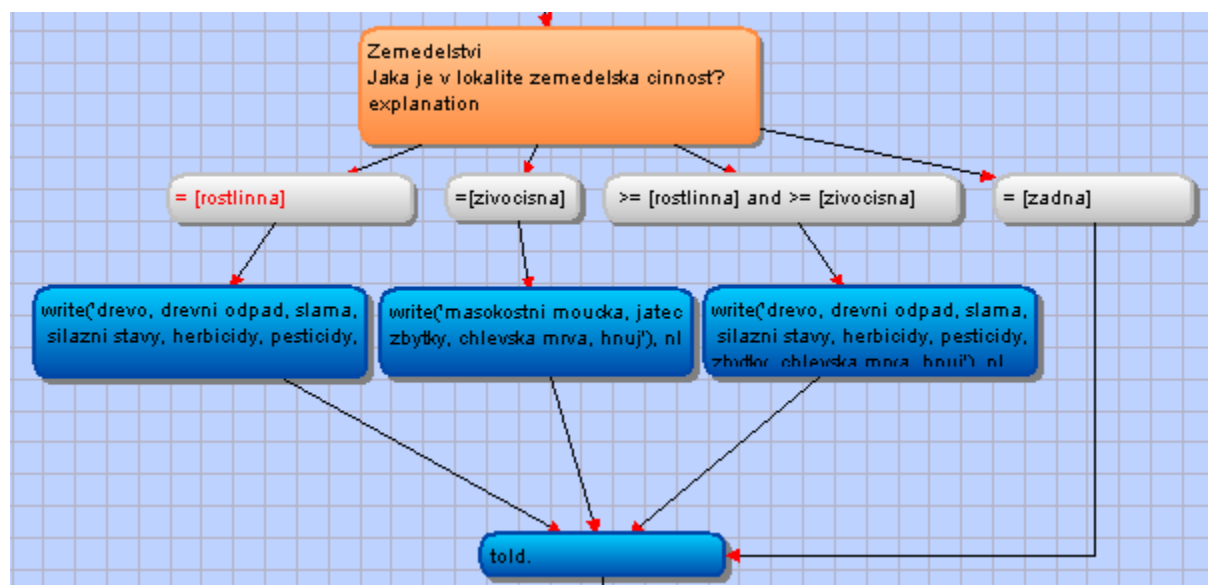
Obdobná situace byla stanovena u zemědělství, které je poněkud méně různorodé z

hlediska druhů produkovaných odpadů, potažmo jejich nebezpečností. Bylo proto zobecněno pouze na živočišnou a rostlinnou výrobu. Zemědělství bylo dlouhou dobu v podstatě bezodpadové hospodářství, díky faktu, že prakticky veškeré organické zbytky byly následně využity buď jako krmivo, nebo jako hnojivo. S rostoucím nasazováním chemických hnojiv, postřiků (herbicidů, pesticidů) a zemědělské techniky stoupá i podíl odpadu, který nelze dále takto využít. Zároveň se však otevírají nové cesty jak využít organické zbytky jako biopaliva k výrobě energie. Podle údajů českého statistického úřadu bylo v roce 2008 vyprodukováno 257 tisíc tun zemědělského odpadu.

Mezi odpady z rostlinné výroby, zahrnující i lesnictví patří především dřevo a dřevní odpad, sláma, silážní šťávy a další. Sláma, přestože je v podstatě odpadní produkt nalézá široké využití jako krmivo, v energetickém využití, kdy se společně s další biomasou používá jako palivo k výrobě tepelné a energetické energie, k výrobě bio lihu, ale také jako stavební materiál díky vynikajícím teplo izolačním vlastnostem [27, 28].

Poněkud problematičtějšími jsou odpady z ochranných postřiků hospodářských plodin. Chemické látky jako pesticidy chránící úrodu proti škůdcům jsou zpravidla velmi nebezpečné pro zvířata ve volné přírodě nebo pokud se dostanou do vodních toků [27, 28].

Látky přítomné v odpadu na základě druhů průmyslu, zemědělství, a dalších činností obsažených v bázi znalostí systému ukazuje obr. 32. Celkové množství takto vyprodukovaných odpadů je určeno ukazatelem intenzity příslušné činnosti v regionu. Vzhledem k tomu, že toto je jedna z informací značně specifických pro lokaci, ve které by byl systém používán, byl tento ukazatel zjednodušen do slovního vyjádření intenzity „vysoká“, „střední“ a „nízká“.



Obr. 37 Schéma vyhodnocení zemědělských odpadů.

Opět jako na několika jiných místech systému, i tyto informace by bylo vhodné čerpat z adekvátně naplněné báze znalostí. Ještě více než u odpadů komunálních je množství a složení odpadů produkovaných komerčními činnostmi závislé na lokalitě a bylo by tedy vhodné provést analýzu a naplnění báze znalostí zvláště pro každý region, kde by se systém používal.

6.4.3 Jiný přístup

Výše popsáný přístup k problematice firemních a obecně ne-komunálních odpadů je pochopitelně pouze jedním z dlouhé řady možných způsobů jak k problému přistupovat. Při získávání informací pro naplnění znalostní báze expertního systému byl částečně vypracován

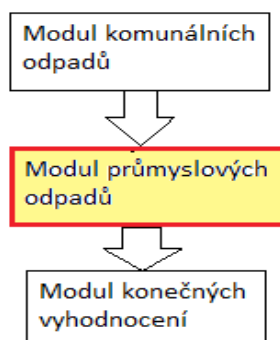
ještě jiný způsob sestavení výše popsaného modulu. Na jeho sestavování se obětavě podílel mimo jiné i Ing. Radek Veselý.

Vychází ze skutečnosti, že kromě ekologických, ekonomických a dalších parametrů výběru vhodné metody zpracování odpadů je nakládání s nimi ve značné míře stanoveno závaznou legislativou. Jako hlavní stavební kameny používá katalogová čísla odpadů, jež jsou definovány vyhláškou Ministerstva životního prostředí č. 381/2001 sb. Ze dne 17. října 2001, která stanoví Katalog odpadů, seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů [16].

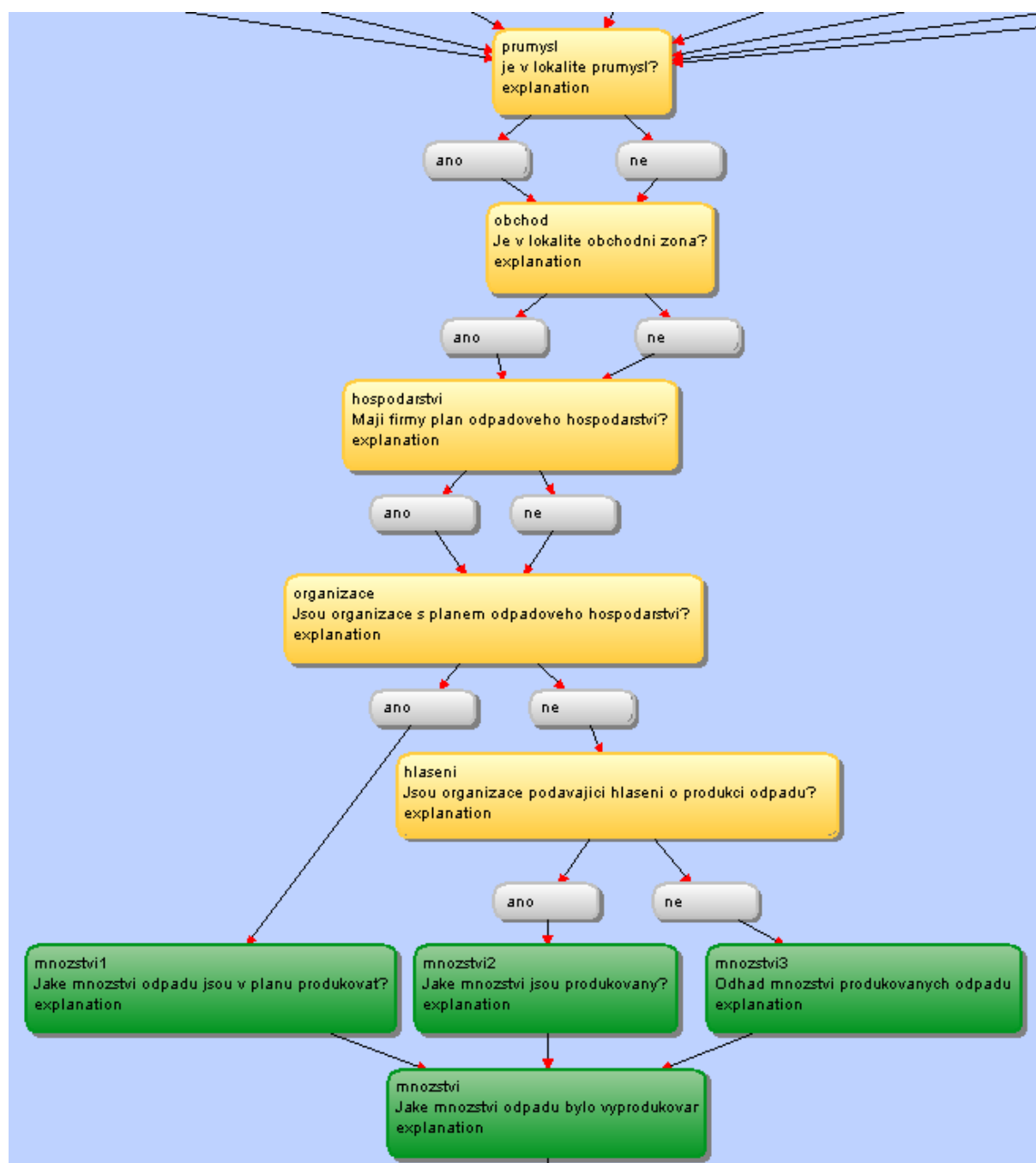
Katalog odpadů je zákonem stanovený seznam druhů odpadů, členěný do skupin a podskupin dle původu daného odpadu, kterých je v současné době dvacet a které jsou pak dále členěny do podskupin dle konkrétnějšího původu a obsahu jednotlivých látek. Například skupinu 01 tvoří odpady produkované geologickým průzkumem, těžbou, úpravou a dalším zpracováním nerostů a kamene. Podskupina 01 01 jsou pak odpady z těžby nerostů, podskupinu 01 01 01 tvoří odpady z těžby rudných nerostů, podskupina 01 01 02 odpady z těžby nerudných nerostů a podobně. Speciálním symbolem „[*]“ jsou označeny všechny odpady, obsahující nebezpečné látky – např. 01 03 04[*] - hlušina ze zpracování sulfidické rudy obsahující kyseliny nebo kyselinotvorné látky [16].

Jak je patrné, katalog odpadů je nesmírně rozsáhlý dokument, který kategorizuje druhy a původce odpadů, nezmiňuje se však o způsobu jejich zpracování. V přístupu sestaveném s ing. Veselým je dále rozebírána problematika odpadového hospodářství. Mnoho podniků má ze zákona nařízeno hlásit produkci a nakládání s odpady, stejně jako vést záznamy o množství vyprodukovaných odpadů v minulých letech a plánech pro léta následující. Ve schématu expertního systému je na toto uživatel dotazován a nasbírané informace jsou předány k dalšímu zpracování. Tyto otázky mají za úkol zjistit, do jaké legislativy daný podnik či podniky spadají a na základě katalogu odpadů obsaženého v bázi znalostí posoudit složení odpadů.

Všechny výše zmíněné informace o složení odpadů pomohou nejen lépe určit vhodnou metodu jejich likvidace nebo využití, ale mohou také pomoci odhalit případy, kdy není s odpady zacházeno dostatečně efektivně. Především je z jejich složení patrný podíl recyklovatelné složky, a látek, které lze dále využít. S těmito by mělo být zacházeno odpovídajícím způsobem a teprve ostatní, dále nevyužitelné látky se stávají odpadem, který je třeba zlikvidovat. V případě, že je v regionu zjištěna výrazně menší míra využívání odpadů než by odpovídalo jejich složení, napovídá to o tom, že by měly být mechanismy jejich zpracování pozmeněny.



Obr. 38 Začlenění tohoto modulu do systému



Obr. 39 Rozhodovací strom sestavený ve spolupráci s Ing. Veselým.

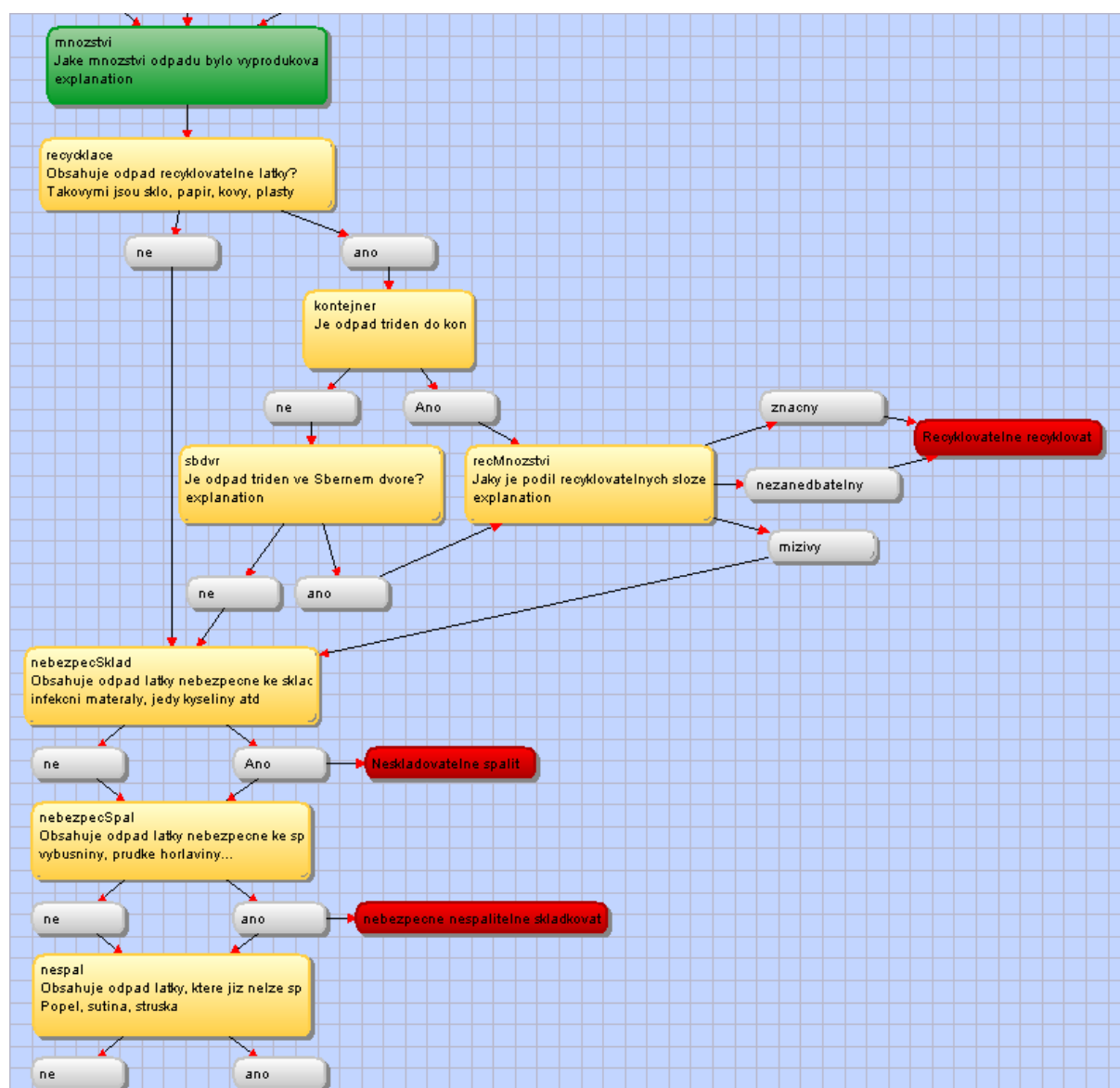
6.4.4 Modul konečných vyhodnocení

Předchozí části systému měly za úkol analyzovat složení a množství vyprodukovaných odpadů na základě informací sesbíraných z obecnějších zdrojů. To znamená z dat o produkci odpadů v minulých letech, odhadech produkce pro rok následující, ze statistických údajů sesbíraných z různých míst a různých časových období a podobně. Může však nastat situace, kdy takto nashromážděné informace nevystihují dostatečně přesně produkci odpadů v konkrétním regionu, potažmo v daném časovém období. Toto může nastat například v důsledku výrazných změn v regionu (probíhá nějaká rozsáhlá stavební činnost, je otevřen nový výrobní podnik, produkující nezanedbatelné množství odpadu..) nebo v důsledku sezónních prací či vlivem přírodních živlů (povodně). Z těchto důvodů je vhodné před

konečným zvolením vhodné metody zpracování odpadů přistoupit k otázce jejich složení poněkud individuálnější způsobem, který zohlední výše zmíněná regionální a časová specifika.

Tyto informace jsou nasbírány prostřednictvím série otázek pokládaných uživateli expertního systému – zpravidla úředníkovi či manažerovi zodpovědnému za odpadové hospodářství v daném regionu. Mají za úkol zjistit odlišnosti ve složení odpadů ve srovnání s informacemi z předchozích modulů pro zpřesnění vyhodnocení.

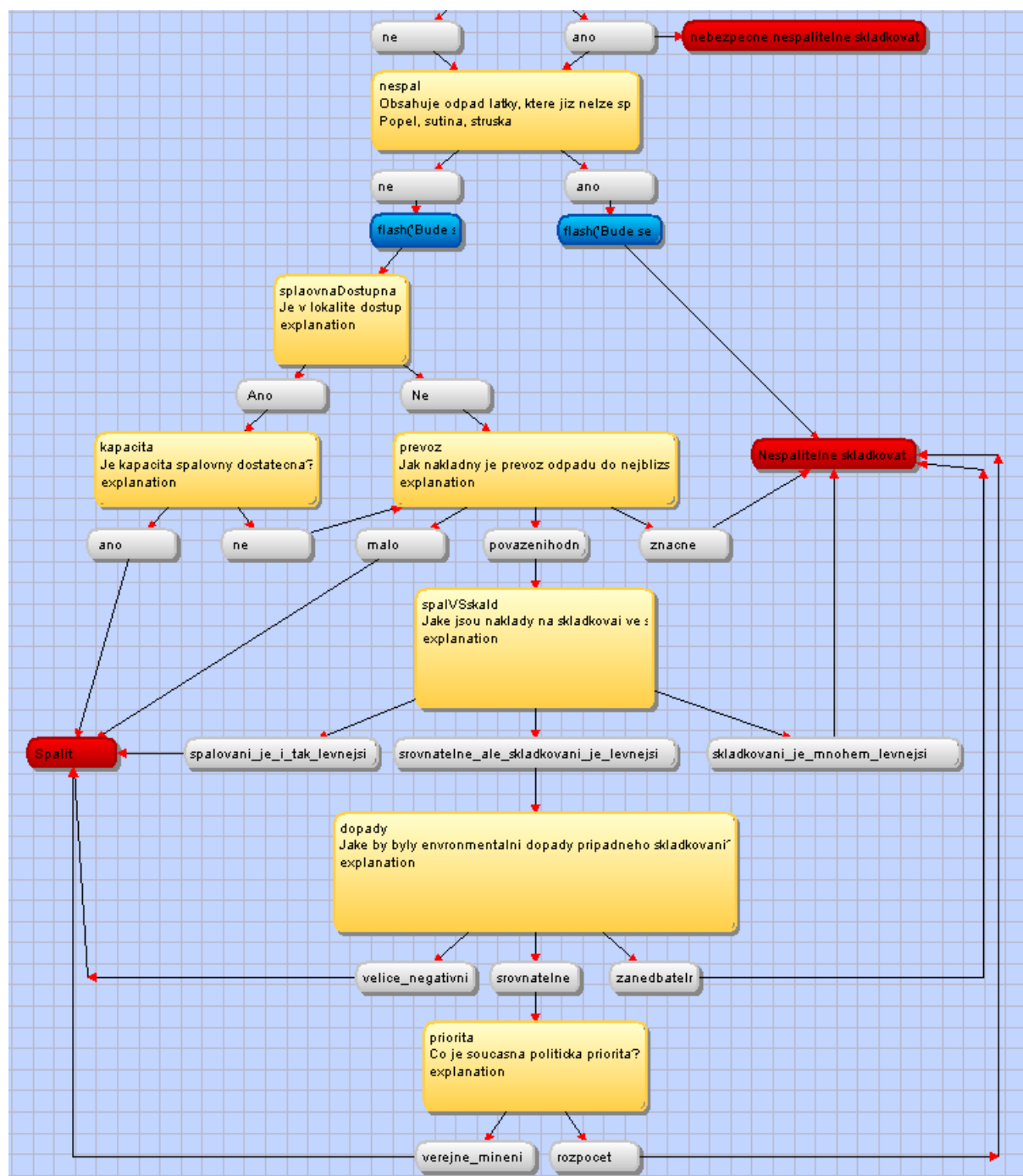
V praxi to znamená, že je uživatel dotazován na přítomnost jednotlivých skupin látek v odpadu a dle toho je učiněno příslušné rozhodnutí. Typy dotazovaných látek jsou převážně materiály, které mají nějaké specifické požadavky z pohledu jejich zpracování jako látky nebezpečné ke skladování (infekční), nebezpečné ke spálení (výbušné), inertní nespalitelné (popel, struska), recyklovatelné (sklo, kov, papír), a další.



Obr. 40 Část rozhodovacího stromu řešící obsah zvláštních složek v odpadu.

Součástí tohoto sub-systému je také několik ekonomicko-politických otázek na zjištění možností a priorit managementu v konkrétní lokalitě. Různé metody zpracování odpadů se liší nejen svojí technologickou a ekologickou vhodností, ale také cenou, přičemž tato kritéria se

vzájemně překrývají a to s různou intenzitou. Tyto otázky mají za úkol zjistit situace, kdy například spalení odpadů je ekologicky lehce vhodnější než jejich skládkování, které je ovšem výrazně levnější, což může mít za následek změnu konečného rozhodnutí, v situaci, kdy se rozpočet obce stává prioritou. Na druhém konci spektra pak leží situace, kdy (například) spalování je výrazně lepší ekologicky, ale nepatrně nákladnější ekonomicky. Tyto situace jsou specifické pro každou konkrétní lokalitu a závisí především na regionálních zdrojích a možnostech (např. spalovna není v regionu k dispozici a tak se převážení odpadů do nějaké nejbližší stává nákladným).



Obr. 41 Část rozhodovacího stromu zahrnující ekonomické aspekty

Další otázky proto směřují na dostupnost spalovny v regionu, dostatečnost její kapacity, ekonomickou a vhodnost případného spalování ve srovnání se skládkováním stejně

jako ekologickou vhodnost takových řešení ve vzájemném poměru. Po zvážení těchto faktorů systém doporučí metodu jejich zpracování, kterou může představovat jeden, ale i více způsobů využití či likvidace podle toho, které jsou na základě dodaných informací vyhodnoceny jako vhodné.

Poté co se vytvořený systém spustí, může dialog, vedený s uživatelem vypadat takto:

?- Jake ročni období zahrnout
leto

?- Druh zastavby
centrum

?- Charakteristika obydlí
sidliste

```
write(Papir+Tertapak = 24%), nl.  
write(Textil = 7%), nl.  
write(Plasty = 5%), nl.  
write(Kovy = 5%), nl.  
write(Sklo = 14%), nl.  
write(Mineral. odp. = 2%), nl.  
write(Drobny odp. = 3%), nl.  
write(Bio odp. = 30%), nl.
```

?- Kolik ma obec obyvatel
10000

Pokračuje se modulem průmyslových odpadů:

?- Je v lokalite vyznamny prumysl
ano

?- Jaky druh prumyslu je zastoupen
strojirensky, hutni

```
write(kovove, plastove materialy. Kovové zbytky z obrabeni  
(trisky, piliny),pouzite chladici kapaliny, rezné emulze,  
olejove filtry a pod.), nl.  
write(Strusky, stery, odpadni kaly, prachy, popel z vyroby  
kovu, obrusy, vyseky, pokovovací lazne ze zpracovani kovu. ),  
nl.
```

?- Jaka je intenzita prumyslove cinnosti
vysoka

?- Jaka je v lokalite zemedelska cinnost
rostlinna

```
write(dřevo a dřevní odpad, sláma, silážní šťávy, herbicidy,  
pesticidy).
```

Pokračuje se modulem konečných vyhodnocení:

?- Obsahuje odpad recyklovatelné látky
ano
?- Je odpad tříděn do kontejneru
ano
?- podíl recyklovatelné složky odpadu
nezanedbatelný
?- Obsahuje odpad nebezpečné látky
ne
?- Obsahuje odpad látky nebezpečné ke spalení
ne
?- je v lokalitě dostupná spalovna
ne
?- Jak nákladný je převoz odpadu do nejbližší spalovny
povoleníhodný
?- Jaké jsou náklady na převoz do spalovny ve srovnání s
náklady na skladování
lehce dražší
?- jaký by byl environmentální dopad případné skladky
silně negativní

--> Obsazené recyklovatelné látky znovu využít, zbytek spálit

Systém vyhodnotil zadané informace a doporučil metodu zpracování odpadů. Nedílnou součástí výstupu jsou textové soubory obsahující složení komunálních, průmyslových a zemědělských odpadů. Na obr. 26 je zobrazeno okno, ve kterém probíhá prakticky veškerá zmíněná komunikace. V horní části je zobrazena otázka, v dolní pak seznam možných odpovědí, ze kterých může uživatel vybírat prostým kliknutím. Uživatel také může kliknout na tlačítko „Explain“ pro bližší vysvětlení položené otázky. Přechod mezi jednotlivými moduly tvoří pouhé položení další otázky a uživatel jej tedy jinak nezaznamená. Ostatně moduly samotné nejsou nijak fyzicky odděleny, jedná se pouze o logicky shluknuté série otázek na podobné téma.

7 ZÁVĚR

Prototyp expertního systému, který byl v rámci této práce vytvořen, disponuje všemi schopnostmi a vlastnostmi tolik typickými pro tento typ softwaru. Má bázi znalostí naplněnou fakty a pravidly, s nimiž pracuje inferenční systém vestavěný ve Flexu. Dokáže komunikovat s uživatelem pomocí interaktivního dialogu, informovat ho o rozhodovacím procesu a vyžádat si od něj dodatečné informace nezbytné pro volbu správného závěru.

Na základě informací o původu odpadu, údajů z předchozích období a dalších informací zadaných uživatelem či obsažených v bázi znalostí, vyhodnocují pravidla systému složení odpadů v daném regionu. Do rozhodovacího procesu jsou zahrnuty nejen technická kritéria vhodnosti použití té či oné metody zpracování odpadů, ale i některé ekologické a ekonomické aspekty a na základě nich systém navrhne vhodný způsob jak je využít, případně zlikvidovat. Systém se soustřeďuje na podporu ekologického způsobu zpracování, tedy upřednostňuje využívání odpadů pro výrobu druhotných materiálů nebo energie před jejich likvidací. Zároveň se pokouší identifikovat v heterogenní směsi odpadů ty látky, které vyžadují specifický způsob zpracování, jako dobře recyklovatelné a využitelné materiály (kov, sklo atd) na jedné straně a naopak látky toxické, infekční, jedovaté a jinak nebezpečné na straně druhé.

Problematika odpadového hospodářství je nesmírně rozsáhlá a pokrývá řadu různorodých vědních oborů, od environmentálního inženýrství přes chemii, biologii, toxikologii až po geologii. Stejně tak expertní systém bývá zpravidla robustní software naplněn stovkami až tisíci údajů jejichž sbírání nežádka předchází rozsáhlá analýza dané problematiky. Vytvořit plnohodnotný expertní systém pro takovou oblast je práce pro celý tým zkušených specialistů po dobu mnoha měsíců.

S natolik omezenými časovými, lidskými a materiálními zdroji, jaké představuje diplomová práce, bylo zapotřebí přistoupit k problému takovým způsobem, který by bylo možno realizovat s dostupnými prostředky.

Přístup, prezentovaný v této práci je proto pouze první krok k sestavení expertního systému postaveného na ekonomicko-ekologického modelu, který může být v budoucnu rozšířen o další modul a zahrnout další aspekty a kritéria pro jednak přesnější vystižení reálných podmínek a také pro relevantnější rozhodnutí z hlediska rozličných kritérií. Data obsažená v bázi znalostí jsou velmi hrubou aproximací a spíše než reálná data představují doporučení, ve kterých oblastech by bylo vhodné provést analýzu pro získání potřebných informací. Vzhledem k obecnosti pojetí, s jakým byl prototyp vytvářen, může téměř každý rozhodovací uzel představovat námět na samostatný rozbor, potažmo sub-systém a každá otázka, kde je uživateli předkládáno několik vzorových možností může reprezentovat celou rozsáhlou bázi znalostí.

Jednou z možností je expertní systém více specializovat. Může se například blíže soustředit pouze na komunální odpady z domácností a nezahrnovat odpady z firem. Nebo může rozebírat detailně pouze jeden způsob zpracování odpadů (například spalování) a posuzovat na základě kritérií specifických pro jednu technologii. Mohl by posuzovat odpad vhodný ke spálení na základě termomechanických vlastností jako je hořlavost, výhřevnost či energetická návratnost spalováním.

Dalšími cestami k plnohodnotnému systému může být implementování některých z technologií jimiž by se dal systém rozšířit. Jednou z nich je fuzzy logika, jejíž způsob implementace byl zmíněn v kap. 6.2.3. S její pomocí by bylo možné lépe kategorizovat složení a množství odpadů nežli s použitím ostrých intervalů.

Jinou z možností jak tohoto dosáhnout je implementace principu LCA - Life cycle assessment [1], který posuzuje odpad z hlediska celého jeho životního cyklu, tedy od těžby surovin pro výrobu materiálu, tvorby výrobku, jeho používání, konec životnosti, dále znovuvyužití například recyklací a následnou likvidaci dále již nevyužitelného materiálu.

V neposlední řadě tu existuje cesta implementace optimalizačních metod. Tyto funkce by byly využitelné především při analýze ekonomické části systému, kde by pomohly minimalizovat náklady spojené nejen s vlastním zpracováním odpadu ale také s jeho transportem, uskladněním, a podobně.

Jak již bylo řečeno výše, k dispozici je velké množství způsobů, jak tento prototyp expertního systému rozšířit. Záleží pouze na určení potenciálního budoucího expertního systému, k jakým účelům bude koncipován.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VLACH, J.: Posuzování životního cyklu komunálního odpadu. Brno, 2008. 80 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [2] DVOŘÁK, J.: Expertní systémy. Brno: VUT, FSI, 2004.
- [3] DVOŘÁK, J.: Jazyky pro umělou inteligenci. Brno: VUT, FSI, 2005.
- [4] BASRI, H., B., Stentiford, E., I., Expert Systems in Solid Waste Management [online], [cit. 2011-04-29] Dostupné z: <<http://wmr.sagepub.com/content/13/1/67.abstract> >
- [5] WEI, Meng-Shiun, Weber, Frederick, Journal of environmental management, An Expert System for Waste Management [online] 1996 [cit. 2011-04-28] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WJ7-45MGX3W-2B&_user=10&_coverDate=04%2F30%2F1996&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1751756284&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=9afa64562e1d39592180ac5caf65ac0f&searchtype=a >
- [6] SAMAH, Hohd Armi Bin Abu, An Expert system for selecting an appropriate solid waste treatment technology, 2009, Universiti Putra Malaysia
- [7] ROUHANI, Shahrokh, Kangari, Roozbeh. Landfill Site Selection: A Microcomputer expert system. 54 s. March 1987, Georgia Institute of Technology.
- [8] GRAHAM Paul. The Roots of Lisp [online] 2001, May [cit. 2011-03-25] Dostupné z: <<http://www.paulgraham.com/rootsoflisp.html>>
- [9] RUBÁČEK, Filip. Programování v Prologu [online] 2005 [cit. 2011-03-28] Dostupné z: <<http://iris.uhk.cz/logpro/iteorie.html>>
- [10] MATUZSEK, David. A Concise introduction to Lisp [online] 2000, October 27 [cit. 2011-03-28] Dostupné z: <<http://www.cis.upenn.edu/~matuszek/LispText/lisp.html>>
- [11] NOVOTNÝ, Daniel. Jemný úvod do Lispu [online] 2004, Duben 21 [cit. 2011-03-10] Dostupné z: <<http://www.root.cz/clanky/jemny-uvod-do-lispu/>>
- [12] LEWIS, Forbes. Essentials of theoretical computer science, University of Kentucky [online] 2005, [cit. 2011-03-29] Dostupné z: <<http://www.cs.uky.edu/~lewis/cs-heuristic/text/enumerat/intsrch.html>>
- [13] FISHER, J., R. Prolog derivation trees, The California State university [online] 2006, [cit. 2011-03-29] Dostupné z: <http://www.csupomona.edu/~jrfisher/www/prolog_tutorial/3_1.html>
- [14] LOISELER, Michel., Vigier, Nicolas. Prolog [online] 2001, [cit. 2011-03-29] Dostupné z: <http://boklm.eu/prolog/page_8.html>
- [15] Šoupal, J.: Metody netermického zpracování odpadů. Brno, 2006. 61 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [16] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech
- [17] <<http://www.purum.cz/2/11/>>
- [18] <<http://www.calla.cz/index.php?path=odpady>>
- [19] KARÁSEK, R.: Transfer těžkých kovů při spalování odpadů. Brno 2006. 4 s. Energie z Biomasy V – odborný seminář. Dostupné z <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_v/papers/10-Karasek.pdf>
- [20] ŠÍMA, K.: Energetické využití komunálního odpadu. Brno, 2010. 132 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [21] Plán odpadového hospodářství statutárního města Brna [online] 2006, Dostupné z <<http://www2.brno.cz/download/ozp/poh/pohbrno.pdf> >
- [22] Svaz Průmyslu a dopravy ČR, Produkce odpadů v roce 2009 v ČR [online], 2009, [cit. 2011-05-01], Dostupné z: <<http://www.spcr.cz/statistika/odpady.htm> >
- [23] Runco Environmental, Inc, Modern Landfill design [online], [cit. 2011-04-06], Dostupné z: <<http://runcoenv.com/landfill.htm> >
- [24] United Nations Environment Programme & United Nations University, From E-Waste to resource, 2009 [online], [cit. 2011-05-08], Dostupné z: <<http://www.unep.fr/en/> >

- [25] SHMELEV, S. E., Powell, J. R. Ecological-economic modelling for strategic regional waste management system, 2005, University of Gloucestershire, UK.
- [26] LPA WinProlog 4.900, 2010, Official documentation.
- [27] Česká informační agentura životního prostředí, produkce průmyslových odpadů. [online], 2011, [cit. 2011-05-07], Dostupné z: <[http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFVZ8VR3/\\$FILE/odpady.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFVZ8VR3/$FILE/odpady.pdf)>.
- [28] Odpady z rostlinné a živočišné výroby, lesnictví a těžby dřeva, rybolovu a akvakultury [online], 2011, [cit. 2011-05-11], Dostupné z: <http://www.ucitsnadno.cz/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=102&category_id=9&option=com_virtuemart&Itemid=61>
- [29] LOH, Christoper, J., An Application of a LISP Based Expert System for Failure Diagnosis of the CH-47 Flight Control Hydraulic system [online], 1986, [cit. 2011-05-15], Dostupné z: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA168970>>
- [30] ROY, John, Lsip listener - Expert systém Nexpert [online], 1991, [cit. 2011-05-15], Dostupné z: <<http://www.mactech.com/articles/mactech/Vol.02/02.03/ExpertSystems/index.html>>